

# **ISOLAMENTO SONORO EM SALAS DE AULA**

## **O CASO PARTICULAR DO EFEITO DA COLMATAÇÃO DE FRINCHAS EM PORTAS**

**NATÁLIA CRISTINA MARTINS DA CUNHA**

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de  
**MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM CONSTRUÇÕES**

---

Orientador: Professor Doutor António Pedro Oliveira de Carvalho

JULHO DE 2014

## **MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2013/2014**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ [miec@fe.up.pt](mailto:miec@fe.up.pt)

*Editado por*

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ [feup@fe.up.pt](mailto:feup@fe.up.pt)

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2013/2014 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2014.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

A meus Pais, Namorado e Amigos

*Uma vida sem desafios não vale a pena ser vivida*

*Sócrates*



## **AGRADECIMENTOS**

Ao concluir este trabalho pretendo mostrar o meu agradecimento a todos aqueles que tornaram a sua realização possível, salientando especial consideração:

Ao Professor Doutor António Pedro de Oliveira Carvalho pela orientação, disponibilidade, conselhos e ajuda, imprescindíveis ao longo de todo o trabalho;

Ao Engenheiro António Eduardo Batista da Costa pela amizade, pelo apoio prestado durante as medições do caso de estudo e pelos conselhos fornecidos;

Ao Engenheiro António Júlio Vasconcelos por permitir a aquisição dos materiais necessários para o caso de estudo, pela sua simpatia e pela sua disponibilidade no momento da aquisição dos materiais;

Ao Sr. Aníbal pela ajuda na colocação dos materiais adquiridos para o caso em estudo;

Aos meus pais por tornarem possível a realização deste curso e por me apoiarem incondicionalmente em todos os momentos;

E por último, aos meus amigos e namorado pelo companheirismo, amizade, paciência e pelo apoio nos momentos mais difíceis.



## RESUMO

Numa sala de aula é necessário garantir o conforto acústico, que se refere a limites que precisam ser respeitados tornando o ambiente acusticamente adequado e agradável aos utilizadores. Trata-se portanto de uma sensação de bem-estar que consiste na ausência de ruídos ou na realização de atividades acústicas que não incomodem. Quando se verifica um aumento do ruído há uma diminuição da inteligibilidade da palavra sendo necessário do professor aumentar a intensidade da voz para compensar essa desvantagem, criando assim maior desgaste físico, psicológico, bem como *stress* inerente. O ambiente académico é um assunto de especial importância para a formação intelectual, fisiológica e mesmo profissional dos cidadãos, este pode tornar-se num ambiente ruidoso provocado pelas atividades de alunos, professores e funcionários. Por isto melhorar as suas condições tem uma função decisiva no crescimento e desenvolvimento de cada um de nós.

O presente trabalho tem como objetivo caracterizar o isolamento sonoro de paredes divisórias de salas de aula com existência de portas para corredores de grande afluência, avaliando o efeito que a devida colmatação das frinchas acarreta para o isolamento. São avaliados parâmetros acústicos como o tempo de reverberação, o  $D_{nT,w}$ , o ruído de fundo e o RASTI que, posteriormente são comparados com a legislação em vigor para salas de aula.

De acordo com o Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios (RRAE) estabelece-se em 30 dB o valor mínimo referente ao índice de isolamento sonoro a ruídos de condução aérea padronizado ( $D_{nT,w}$ ) em paredes de salas de aula com corredores.

Numa primeira fase procedeu-se à medição dos níveis de pressão sonora *in situ*, por banda de frequência, nos locais emissor (corredor) e recetor (B024), sem qualquer acréscimo de isolamento sonoro nas portas, em períodos de grande afluência, tendo-se obtido um isolamento sonoro a ruídos de condução aérea de 23 dB e um isolamento sonoro bruto da parede divisória (sala de aula/corredor) de aproximadamente 22 dB(A). Além disso, obteve-se um valor médio de RASTI de 0,50 e um tempo de reverberação médio de 1,8 s no interior dessa sala.

Numa segunda fase procedeu-se à medição dos níveis de pressão sonora *in situ*, por banda de frequência, nos locais emissor (corredor) e recetor (B024), neste caso com a existência de melhoria do isolamento sonoro, em todo o perímetro da porta da sala em estudo. Para o aro da porta foi utilizado um único tipo de material e para a frincha inferior optou-se pela avaliação de diferentes materiais, tendo-se obtido um valor do  $D_{nT,w}$  para a melhor solução, de 27 dB e um isolamento sonoro bruto de 26 dB(A).

Uma vez que o ambiente escolar é desenvolvido com o objetivo de maximizar as potencialidades humanas, é imprescindível que este esteja adequado à função a que se destina. Perante a análise realizada verificou-se que, sem qualquer acréscimo de isolamento sonoro nas portas, o valor que se obteve para o  $D_{nT,w}$  de 23 dB (considerando o fator I) não estava legal. Após a colocação de isolamento sonoro em todo o perímetro da porta da sala de aula constatou-se que, para a melhor solução de isolamento sonoro, o valor do  $D_{nT,w}$  de 27 dB (considerando o fator I) já se encontra legal. Em suma, a intervenção proposta além de ser bastante económica permite obter, para a melhor solução de isolamento sonoro, uma melhoria do  $D_{nT,w}$ , face à situação inicial da sala de aula, de 4 dB e uma redução do ruído transmitido para o interior da sala de 4 dB(A).

PALAVRAS-CHAVE: Acústica, Isolamento Sonoro, Portas, Escolas, Ruído.





## ABSTRACT

In a classroom it is necessary to ensure acoustic comfort, which refers to the limits which must be respected, providing a pleasant and acoustically environment for users. We are talking about a sense of well-being which consists in the absence of noise or in the execution of acoustic activities which do not disturb. When there is an increase in noise there is a decrease in speech intelligibility, and consequently it is necessary for the teacher to increase the intensity of his voice to compensate this disadvantage, which causes greater physical and psychological strain, as well as the inherent stress. The academic environment is an issue of key importance with regard to the intellectual, physiological and even professional development of citizens and it can turn into a noisy environment caused by the activities of students, teachers and other staff. Therefore, the improvement of these conditions plays a crucial role in the growth and development of each one of us.

This study aims at characterizing the sound insulating of classrooms partition walls with doors to corridors with high influx of people, and evaluating the effect of filling the frame slits on sound insulation. Acoustic parameters such as reverberation time,  $DnT,w$ , background noise, sound insulation index and RASTI have been measured and compared with the current Portuguese legislation for classrooms.

According to the Regulation of Acoustic Requirements for Buildings (RRAE), 30 dB is established as the minimum value for the index of sound insulation regarding standard air conduction noise ( $DnT,w$ ) for partition walls between classrooms and corridors.

In a first phase were carried out measurements of sound pressure levels, during peak times, by 1/3 frequency bands, in the soiree (corridor) and the receiver (classroom) areas, without any additional sound insulation in the doors, having obtained a sound insulation regarding air conduction noise of 23 dB and a gross sound insulation of the partition wall (classroom/corridor) of approximately 22 dB(A). In addition, we obtained an average RASTI value of 0.50 and an average reverberation time of 1.8 seconds inside the receive room (B024).

In a second stage, were carried out the measurements of sound pressure by means of frequency band, in the corridor and receiver (B024) areas, now with an improvement in sound insulation around the perimeter of the classroom door under study. One single type of material was used for the door frame and for the lower slit we decided to evaluate different materials, having obtained a 27 dB  $DnT,w$  value of 27 dB, for the best solution, and a gross sound insulation of 26 dB(A).

Since school environment is developed to maximize human potential, it is essential that it is appropriate for its function. Given the analysis which has been carried out it was observed that without any additional sound insulation in the doors, the  $DnT,w$  value of 23 dB obtained, even considering the factor I, was not in accordance with the law. After the installation of sound insulation around the perimeter of the classroom door it was observed that the best solution for sound insulation, with a  $DnT,w$  value of 27 dB and considering the factor I, was in accordance to the law. In conclusion, not only is the proposed intervention was quite economical, but it also represents a better sound insulation solution, allowing an improvement in the  $DnT,w$  value of 4 dB, in comparison with the initial situation and a noise reduction inside the room of 4 dB(A).

**KEYWORDS:** Acoustics, Sound Insulation, Doors, Schools, Noise.



## ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS .....	i
RESUMO .....	iii
ABSTRACT .....	v
ÍNDICE GERAL .....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS .....	xi
ÍNDICE DE QUADROS .....	xv
SÍMBOLOS E ABREVIATURAS .....	xvii

<b>1. OBJETIVOS E DESCRIÇÃO DO TRABALHO .....</b>	<b>1</b>
1.1. ENQUADRAMENTO DO PROBLEMA .....	1
1.2. OBJETIVOS .....	2
1.3. DESCRIÇÃO DO TRABALHO .....	2
<b>2. CONCEITOS E DEFINIÇÕES .....</b>	<b>3</b>
2.1. SOM E RUÍDO .....	3
2.2. PARÂMETROS BÁSICOS DO SOM .....	4
2.2.1. PRESSÃO SONORA .....	4
2.2.2. POTÊNCIA SONORA .....	6
2.2.3. INTENSIDADE SONORA .....	6
2.3. FREQUÊNCIA .....	8
2.4. FONTES DE RUÍDO .....	10
2.5. OUVIDO HUMANO .....	11
2.6. FENÓMENOS DE REFLEXÃO, DIFUSÃO, DIFRAÇÃO E REFRAÇÃO .....	15
2.6.1. REFLEXÃO .....	15
2.6.2. DIFUSÃO .....	16
2.6.3. DIFRAÇÃO .....	16
2.6.4. REFRAÇÃO .....	16
2.7. SOM DIRETO E SOM REVERBERADO .....	17
2.8. ABSORÇÃO SONORA .....	17
2.8.1. DEFINIÇÕES .....	17
2.8.2. MATERIAIS ABSORVENTES .....	19

2.8.2.1. CONCEITOS .....	19
2.8.2.2. MATERIAIS POROSOS E FIBROSOS.....	20
2.8.2.3. RESSOADORES .....	20
2.8.2.4. MEMBRANAS.....	22
2.8.2.5. ABSORÇÃO DO AR .....	22
<b>2.9. ISOLAMENTO SONORO A RUÍDOS AÉREOS .....</b>	<b>23</b>

### **3. ACÚSTICA EM SALAS DE AULA .....**

<b>3.1. INTELIGIBILIDADE DA PALAVRA .....</b>	<b>29</b>
<b>3.2. STI E RASTI .....</b>	<b>30</b>
<b>3.3. RUÍDO DE FUNDO E CURVAS DE INCOMODIDADE .....</b>	<b>31</b>
<b>3.4. TEMPO DE REVERBERAÇÃO .....</b>	<b>33</b>
<b>3.5. LEGISLAÇÃO .....</b>	<b>35</b>
3.5.1. PORTUGAL .....	35
3.5.2. OUTROS PAÍSES .....	37

### **4. TIPOS DE ISOLAMENTO PARA PORTAS .....**

<b>4.1. FRINCHAS LATERAIS E SUPERIORES .....</b>	<b>41</b>
<b>4.2. FRINCHAS INFERIORES.....</b>	<b>42</b>

### **5. ENSAIOS .....**

<b>5.1. CARATERIZAÇÃO DA AMOSTRA .....</b>	<b>45</b>
<b>5.2. RUÍDO DE FUNDO .....</b>	<b>46</b>
<b>5.3. TEMPO DE REVERBERAÇÃO .....</b>	<b>47</b>
<b>5.4. RAPID SPEECH TRANSMISSION INDEX - RASTI .....</b>	<b>48</b>
<b>5.5. ÍNDICE DE ISOLAMENTO SONORO A RUÍDOS DE CONDUÇÃO AÉREA PADRONIZADO.....</b>	<b>49</b>

### **6. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS .....**

<b>6.1. SITUAÇÃO INICIAL – SEM TRATAMENTO DAS FRINCHAS.....</b>	<b>51</b>
6.1.1. RUÍDO DE FUNDO .....	51
6.1.2. TEMPO DE REVERBERAÇÃO .....	53
6.1.3. RAPID SPEECH TRANSMISSION INDEX - RASTI.....	55
6.1.4. ÍNDICE DE ISOLAMENTO SONORO A RUÍDOS DE CONDUÇÃO AÉREA PADRONIZADO .....	56

<b>6.2. SITUAÇÃO COM TRATAMENTO DAS FRINCHAS .....</b>	<b>56</b>
--	-----------

## **7. COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS.....67**

<b>7.1. COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS PARA AS DIFERENTES SITUAÇÕES DE ISOLAMENTO COM DIFERENTES LEGISLAÇÕES.....</b>	<b>67</b>
--	-----------

<b>7.2. COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS PARA A SALA B024 COM OS VALORES OBTIDOS PARA UMA SALA ACUSTICAMENTE TRATADA (B032) .....</b>	<b>69</b>
--	-----------

## **8. SUGESTÃO DE MELHORIA PARA A SALA B024.....71**

## **9. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS .....75**

<b>9.1. CONCLUSÕES.....</b>	<b>75</b>
-----------------------------	-----------

<b>9.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS .....</b>	<b>76</b>
--	-----------

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....77**



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Parâmetros necessários para que o som se propague .....	3
Figura 2.2 - Propagação do som no ar [2] .....	3
Figura 2.3 - Variação da pressão sonora no tempo [3] .....	4
Figura 2.4 - Amplitude de uma onda sonora [4] .....	5
Figura 2.5 - Pressão eficaz (RMS) [5] .....	6
Figura 2.6 - Relação da intensidade sonora com a distância à fonte [Adaptado de 6] .....	7
Figura 2.7 - Frequências do som [9] .....	9
Figura 2.8 - Espectro sonoro [10] .....	9
Figura 2.9 - Definição prática de banda de frequência [11] .....	9
Figura 2.10 - Diminuição do nível sonoro com o aumento da distância à fonte para uma fonte pontual [12] .....	11
Figura 2.11 - Diminuição do nível sonoro com o aumento da distância à fonte para uma fonte linear [13] .....	11
Figura 2.12 - Esquema do ouvido humano [14] .....	12
Figura 2.13 - Esquema da cóclea humana [15] .....	12
Figura 2.14 - Esquema de células ciliadas danificadas [16] .....	13
Figura 2.15 - Ondas sonoras ao longo da membrana basilar [Adaptado de 17] .....	13
Figura 2.16 - Curvas de igual sensibilidade auditiva (em fone), segundo ISO 226 [18] .....	14
Figura 2.17 - Curvas de ponderação A, B, C e D [19] .....	14
Figura 2.18 - Energia sonora refletida [Adaptado de 20] .....	15
Figura 2.19 - Dispersão sonora das reflexões em difusão [Adaptado de 21] .....	16
Figura 2.20 - Exemplo de difração sonora [22] .....	16
Figura 2.21 - Exemplo do fenómeno de refração entre dois meios diferentes [23] .....	16
Figura 2.22 - Caso típico de uma sala de aula [Adaptado de 24] .....	17
Figura 2.23 - Propagação do som [25] .....	18
Figura 2.24 - Variação do coeficiente de absorção de um dado material com a frequência [4] .....	19
Figura 2.25 - Comportamento em frequência dos diferentes tipos de materiais absorventes [Adaptado de 1] .....	19
Figura 2.26 - Aumento da absorção sonora nas baixas frequências num material fibroso [4] .....	20
Figura 2.27 - Representação esquemática de um ressoador [Adaptado de 26] .....	21
Figura 2.28 - Exemplo de ressoadores agrupados [4] .....	21
Figura 2.29 - Representação esquemática de uma membrana [Adaptado de 4] .....	22
Figura 2.30 - Esquema de transmissão de ruídos aéreos [4] .....	23

Figura 2.31 - Transmissão de ruído por via direta (TD) e marginal (TM) [Adaptado de 27].....	24
Figura 2.32 - Transmissão sonora direta entre dois compartimentos [Adaptado de 28] .....	25
Figura 2.33 - Variação da redução sonora média do conjunto do pano de parede com a área da frincha existente no contorno da porta .....	26
Figura 2.34 - Curva de valores de referência para ruídos de condução aérea (para o cálculo de $DnT,w$ e $D2m,nT,w$ ) [29] .....	27
Figura 3.1 - Distribuição das ondas sonoras para altas e baixas frequências [31] .....	30
Figura 3.2 - Direccionalidade frontal da voz [32].....	30
Figura 3.3 - Inteligibilidade da palavra em função da relação sinal - ruído [33] .....	31
Figura 3.4 - Curvas de incomodidade NC – “Noise Criterion” [34] .....	32
Figura 3.5 - Curvas de incomodidade NR – “Noise Rating” [35].....	32
Figura 3.6 - Tempo de reverberação [37] .....	33
Figura 3.7 - Representação gráfica do tempo de reverberação [Adaptado de 1].....	34
Figura 3.8 - Efeito na inteligibilidade da palavra <i>back</i> em dois cenários de tempo de reverberação (0,5 e 1,5 s) [1].....	34
Figura 4.1 - Modo de aplicação do material isolante nas frinchas existentes no aro da porta [43] .....	41
Figura 4.2 - Material adesivo utilizado para a colmatação de frinchas [43] .....	43
Figura 4.3 - Material em perfil de metal aparafusado à porta [43] .....	43
Figura 4.4 - Escova de <i>nylon</i> fixa num perfil de metal aparafusado à porta [43].....	43
Figura 5.1 - Planta da FEUP na data da sua inauguração [44] .....	45
Figura 5.2 - Posições escolhidas para medição do ruído de fundo no interior e exterior da sala B02446	
Figura 5.3 - Sonómetro Brüel & Kjær 2260 colocado no interior da sala B024 [Fotografia da autora] .....	47
Figura 5.4 - Posições escolhidas para a medição do tempo de reverberação no interior da sala B024, sendo F a posição do emissor e os círculos as diferentes posições do sonómetro .....	47
Figura 5.5 - Fonte sonora Brüel & Kjær 4224 [Fotografia da autora].....	48
Figura 5.6 - Transmissor RASTI Brüel & Kjær 4225 [Fotografia da autora] .....	48
Figura 5.7 - Recetor RASTI Brüel & Kjær 4419 [Fotografia da autora].....	48
Figura 5.8 - Posições escolhidas para a colocação da fonte sonora Brüel & Kjær 4224 (F) e medição dos níveis de pressão sonora, no interior e exterior da sala B024 (círculos) .....	49
Figura 6.1 - Níveis de pressão sonora ( $L_{eq}$ ) no interior e exterior da sala B024 em situação de ruído de fundo em período de aulas.....	52
Figura 6.2 - Níveis de pressão sonora corrigidos com filtro A ( $L_{Aeq}$ ) no interior e exterior da sala B024 em situação de ruído de fundo em período de aulas .....	52
Figura 6.3 - Isolamento sonoro bruto (D) da parede divisória da sala B024 e corredor (com duas portas) em situação de ruído de fundo em período de aulas.....	53



Figura 6.4 - Valores do tempo de reverberação (s) nos seis pontos de ensaio na sala B024 e o limite máximo cf. RRAE .....	54
Figura 6.5 - Resultados do RASTI para a sala B024 em período de aulas .....	55
Figura 6.6 - Isolamento da frincha lateral e superior das portas da sala B024 [Fotografia da autora].	57
Figura 6.7 - Empeno na porta P1 da sala B024 [Fotografias da autora] .....	57
Figura 6.8 - Índice de isolamento sonoro (não normalizado) a ruídos de condução aérea para as diferentes situações analisadas .....	62
Figura 6.9 - Ordem crescente do aumento face à situação inicial do índice de isolamento sonoro não normalizado para as diferentes situações analisadas .....	63
Figura 6.10 - Diferença dos níveis de pressão sonora (exterior – interior) para as diferentes situações de isolamento da sala B024 analisadas relativamente à situação inicial .....	64
Figura 7.1 - Sala da FEUP acusticamente tratada (B032) [Fotografia da autora] .....	69
Figura 8.1 - Valores obtidos para o tempo de reverberação após intervenção de correção na sala B024, em bandas de frequência de oitava dos 500 aos 2000 Hz. Comparação do valor medido na sala com as propostas de correção .....	73
Figura 8.2 - Área de teto da sala B024 preenchida com <i>K13 fc</i> (40 m <sup>2</sup> ) .....	74
Figura 8.3 - Área de teto da sala B024 preenchida com <i>SonaKrete</i> (50 m <sup>2</sup> ).....	74



## ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 - Velocidade de propagação das ondas sonoras em diferentes meios de propagação [7].	7
Quadro 2.2 - Exemplos de níveis de potência sonora e a correspondente pressão e intensidade sonora [8].....	8
Quadro 2.3 - Valores numéricos das ponderações da curva A para bandas de frequência 1/1 e 1/3 de oitava na gama audível [1] .....	15
Quadro 2.4 - Valores da absorção sonora ( $m^{-1}$ ) do ar em função da frequência e humidade relativa [1] .....	23
Quadro 2.5 - Valores indicativos do efeito do isolamento sonoro nas condições de audibilidade [1] ..	28
Quadro 3.1 - Qualidade acústica e inteligibilidade da palavra [Adaptado de 30] .....	29
Quadro 3.2 - Variabilidade da emissão da voz entre vogais e consoantes [1] .....	30
Quadro 3.3 - Variabilidade da qualidade acústica com o valor de RASTI [Adaptado de 1] .....	31
Quadro 3.4 - Valor máximo recomendado para as curvas de NC para salas de aula [Adaptado de 36] .....	33
Quadro 3.5 - Valores limite mínimos de $D_{nT, W}$ , entre locais do edifício, segundo o RRAE [38] .....	36
Quadro 3.6 - Limites para o tempo de reverberação segundo RRAE [38] .....	36
Quadro 3.7 - Nível de $L_{Ar, nT}$ limite, segundo o RRAE [38] .....	36
Quadro 3.8 - Valores mínimos de $D_{nT, W}$ em edifícios escolares, segundo os requisitos ingleses BB 93 [39].....	37
Quadro 3.9 - Valores máximos do tempo de reverberação, segundo os requisitos ingleses BB 93 [Adaptado 39] .....	37
Quadro 3.10 - Valor mínimo do <i>Speech Transmission Index</i> (STI) em edifícios escolares segundo os requisitos ingleses BB 93 [Adaptado de 39] .....	38
Quadro 3.11 - Valores mínimos de $D_{nT, W}$ recomendados segundo os requisitos franceses [Adaptado de 41].....	38
Quadro 3.12 - Limites para o tempo de reverberação, segundo a legislação francesa [41] .....	38
Quadro 3.13 - Valores máximos do tempo de reverberação e ruído de fundo segundo a AS/NZS 2107 [Adaptado de 42] .....	39
Quadro 3.14 - Valores mínimos de $R_w$ recomendados segundo AS/NZS 2107 [Adaptado de 42] .....	39
Quadro 3.15 - Comparação entre Portugal, Reino Unido, França e Nova Zelândia perante quatro situações [38,39,41,42] .....	40
Quadro 4.1 - Listagem de alguns materiais que podem ser aplicados em frinchas laterais e superiores existentes em portas .....	42
Quadro 4.2 - Listagem de alguns materiais que se podem aplicar em frinchas inferiores existentes em portas.....	43
Quadro 5.1 - Descrição da sala utilizada como caso de estudo da FEUP .....	46

Quadro 6.1 - Valores dos níveis de pressão sonora ( $L_{eq}$ ), para as bandas de frequência de 1/1 oitava, no interior e exterior da sala B024 em situação de ruído de fundo em período de aulas .....	51
Quadro 6.2 - Valores dos níveis de pressão sonora corrigidos com filtro A ( $L_{Aeq}$ ), para as bandas de frequência de 1/1 oitava, no interior e exterior da sala B024 em situação de ruído de fundo em período de aulas .....	52
Quadro 6.3 - Resultados obtidos para o tempo de reverberação na sala B024.....	54
Quadro 6.4 - Resultados do RASTI para a sala B024 em período de aulas .....	55
Quadro 6.5 - Valores médios dos níveis de pressão sonora no interior e exterior da sala B024 e o valor do índice de isolamento sonoro a ruídos de condução aérea .....	56
Quadro 6.6 - Materiais utilizados para calafetar a frincha inferior das portas da sala B024 .....	58
Quadro 6.7 - Descrição das situações consideradas para a análise do índice de isolamento sonoro a ruídos de condução aérea.....	59
Quadro 6.8 - Valores médios dos níveis de pressão sonora no interior e exterior da sala B024 e o valor do índice de isolamento sonoro a ruídos de condução aérea na situação FL.....	59
Quadro 6.9 - Valores médios dos níveis de pressão sonora no interior e exterior da sala B024 e o valor do índice de isolamento sonoro a ruídos de condução aérea na situação FL+RD .....	60
Quadro 6.10 - Valores médios dos níveis de pressão sonora no interior e exterior da sala B024 e o valor do índice de isolamento sonoro a ruídos de condução aérea na situação FL+E .....	60
Quadro 6.11 - Valores médios dos níveis de pressão sonora no interior e exterior da sala B024 e o valor do índice de isolamento sonoro a ruídos de condução aérea na situação FL+P .....	61
Quadro 6.12 - Valores médios dos níveis de pressão sonora no interior e exterior da sala B024 e o valor do índice de isolamento sonoro a ruídos de condução aérea na situação FL+B .....	61
Quadro 6.13 - Resultado do índice de isolamento sonoro a ruídos de condução aérea para as diferentes situações analisadas para a separação entre a sala B024 e o corredor .....	62
Quadro 6.14 - Diferença dos níveis de pressão sonora recebidos no interior da sala para as diferentes situações de isolamento analisadas relativamente à situação inicial .....	64
Quadro 7.1 - Comparação do tempo de reverberação, índice de isolamento a ruídos de condução aérea e RASTI com diversas legislações .....	68
Quadro 7.2 - Comparação entre a sala acusticamente tratada (B032) e a sala em estudo (B024) [46] .....	69
Quadro 8.1 - Materiais utilizados para a correção acústica da sala B024.....	71
Quadro 8.2 - Absorção sonora real existente na sala B024, em bandas de frequência de oitava dos 500 aos 2000 Hz .....	72
Quadro 8.3 - Valores calculados do tempo de reverberação da sala de acordo com a proposta de correção 1, em bandas de frequência de oitava dos 500 Hz aos 2000 Hz .....	72
Quadro 8.4 - Valores calculados do tempo de reverberação da sala de acordo com a proposta de correção 2, em bandas de frequência de oitava dos 500 Hz aos 2000 Hz .....	73

## **SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS**

$\alpha$  – Coeficiente de absorção sonora teórico

$\alpha_w$  – Coeficiente de absorção sonora médio ponderado

$\rho$  – Massa volúmica [ $\text{kg/m}^3$ ]

$\tau$  – Coeficiente de transmissão

$\theta$  – Temperatura do ar [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$^{\circ}\text{C}$  – Grau celsius (unidade de medida)

$A$  – Área de absorção sonora equivalente [ $\text{m}^2$ ]

AVAC – Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado

$c$  – Celeridade [ $\text{m/s}$ ]

$d$  – Largura [ $\text{m}$ ]

$\text{dB}$  – Decibel (unidade de medida)

$D$  – Isolamento sonoro bruto a ruídos de condução aérea [ $\text{dB}$ ]

$D_{nT,w}$  – Índice de isolamento sonoro a ruídos de condução aérea padronizado [ $\text{dB}$ ]

$D_{nT,wd}$  – Índice de isolamento sonoro a ruídos de condução aérea padronizado, não normativo [ $\text{dB}$ ]

$D_{2m,nT,w}$  – Índice de isolamento sonoro a ruídos e condução aérea padronizado com o exterior [ $\text{dB}$ ]

$e$  – Espessura [ $\text{m}$ ]

$f$  – Frequência [ $\text{Hz}$ ]

$f_0$  – Frequência central de banda [ $\text{Hz}$ ]

$f_1$  – Frequência limite inferior de banda [ $\text{Hz}$ ]

$f_2$  – Frequência limite superior de banda [ $\text{Hz}$ ]

F.C. – Fator corretivo

FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

HR – Humidade relativa [%]

Hz – Hertz (unidade de medida)

$I$  – Intensidade sonora [ $\text{W/m}^2$ ]

$I_0$  – Intensidade sonora de referência [ $\text{W/m}^2$ ]

$L_{A,nT}$  – Nível de avaliação padronizado, ponderado A [ $\text{dB}$ ]

$L_E$  – Nível de pressão sonora no compartimento emissor [ $\text{dB}$ ]

$L_{eq}$  – Nível de pressão sonora contínuo equivalente [ $\text{dB}$ ]

$L_I$  – Nível de intensidade sonora [ $\text{dB}$ ]

$L_P$  – Nível de pressão sonora [ $\text{dB}$ ]

$L_R$  – Nível de pressão sonora no compartimento recetor [ $\text{dB}$ ]

$L_w$  – Nível de potência sonora [dB]

$m$  – Massa superficial [ $\text{kg/m}^2$ ]

$\text{ms}$  – Milésimos de segundo (unidade de medida)

NC – *Noise Criteria*

NCB – *Ballanced Noise Criteria*

NR – *Noise Rating*

$p$  – Pressão sonora [Pa]

$p_0$  – Pressão sonora de referência [Pa]

$p_{\text{ef}}$  – Pressão eficaz [Pa]

$r$  – Distância emissor-recetor [m]

$r_f$  – Ruído de fundo [dB]

R – Redução sonora [dB]

RASTI – *Rapid Speech Transmission Index*

RC – *Room Criterion*

RMS – *Root Mean Square*

RRAE – Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios

s – Segundos

S – Área [ $\text{m}^2$ ]

STI – *Speech Transmission Index*

T – Temperatura [K]

TR – Tempo de reverberação [s]

$\text{TR}_0$  – Tempo de reverberação de referência [s]

TR30 – Tempo de reverberação determinado por um decaimento de 30 dB [s]

TR[500, 1k, 2k Hz] – Tempo de reverberação médio nas frequências dos 500 aos 2000 Hz [s]

V – Volume [ $\text{m}^3$ ]

W – Potência sonora [W]

$W_0$  – Potência sonora de referência [W]







# 1

## OBJETIVOS E DESCRIÇÃO DO TRABALHO

### 1.1. ENQUADRAMENTO DO PROBLEMA

A acústica de edifícios veio contribuir para uma crescente melhoria da qualidade de vida das pessoas fornecendo elementos desejáveis e estipulados para diferentes tipos de edifícios. Os locais destinados à aprendizagem, formação e educação devem ser projetados de forma especial de modo a serem adequados ao fim a que se destinam.

Para locais onde a comunicação é primordial uma boa inteligibilidade da palavra e um baixo nível de ruído é fundamental. Segundo a Organização Mundial da Saúde existem dificuldades na comunicação verbal a partir dos 40 dB e a partir dos 65 dB há uma diminuição do poder de concentração que prejudica a produtividade e o trabalho intelectual [51]. Além disso, para fazer face ao ruído existente na sala o professor tende a aumentar a intensidade da voz, originando um maior desgaste físico e psicológico. O valor do ruído máximo aconselhado para uma sala de aula varia entre os 35 e 45 dB [51].

Para a conceção de salas de aula com a devida qualidade acústica é necessário seguir determinadas diretrizes acústicas, tais como a análise cuidada do tempo de reverberação, das reflexões indesejáveis e das fontes de ruído. No caso em estudo será dada especial atenção às fontes de ruído proveniente de corredores de grande afluência.

Um dos problemas que se pode verificar na conceção de salas de aula é o mau isolamento sonoro de paredes divisórias com portas. A existência de espaços de ar, designadamente frinchas, entre a parede e a porta contribui significativamente para uma diminuição do isolamento sonoro do conjunto e, consequentemente, para um aumento do ruído no interior das salas.

A qualidade acústica de um espaço pode ser obtida de duas formas: através de correções acústicas no espaço, para que os sons aí emitidos sejam perceptíveis e através de isolamento sonoro para evitar que determinado ruído produzido num espaço não passe para um outro espaço contíguo a este.

No processo de planeamento dos espaços destinados à aprendizagem é necessário ter em consideração os materiais de construção utilizados no seu interior, uma vez que a aplicação de materiais apropriados logo no início reduzem substancialmente o investimento quando comparado com a necessidade da sua renovação posterior.

Em suma, a aprendizagem funciona como o ajuste dos sentidos, a transformação da consciência, a adaptação e interpretação do mundo. É por isso, fundamental proporcionar espaços com as melhores condições possíveis para a formação física e intelectual dos cidadãos.

## **1.2. OBJETIVOS**

O principal objetivo deste trabalho é avaliar a influência de frinchas existentes em portas no isolamento sonoro de paredes divisórias entre salas de aula e corredores de grande afluência. Para tal serão avaliados parâmetros acústicos como o tempo de reverberação, o ruído de fundo, o índice de isolamento sonoro e o RASTI, de modo a obter alguns conhecimentos sobre esta matéria.

Como caso particular de estudo, será analisado o efeito da colmatação de isolamento sonoro em todo o perímetro das portas de uma sala de aula da FEUP (B024), verificando assim os efeitos benéficos relativamente à diminuição do ruído no interior da sala.

## **1.3. DESCRIÇÃO DO TRABALHO**

Esta dissertação encontra-se dividida em nove capítulos, cuja descrição é a seguinte:

O Capítulo 1, “Objetivos e descrição do trabalho” apresenta o enquadramento do problema, contextualizando a importância do ruído aquando da conceção dos espaços e a importância de ter um espaço com uma boa qualidade acústica na aprendizagem dos cidadãos. Define também quais os objetivos gerais e específicos, bem como uma descrição pormenorizada de cada capítulo;

O Capítulo 2, “Conceitos e definições”, apresenta uma breve descrição dos parâmetros fundamentais, da acústica, relacionados com o tema em estudo;

O Capítulo 3, “Acústica em salas de aula” refere-se a conceitos importantes a ter em conta em salas de aula, como, inteligibilidade da palavra, o STI e o RASTI, o ruído de fundo e as curvas de incomodidade;

O Capítulo 4, “Tipos de isolamentos para portas” são apresentados os tipos de isolamentos existentes a aplicar em frinchas laterais e inferiores de portas, exemplificando com algumas marcas e respetivos custos;

O Capítulo 5, “Ensaaios” refere-se às descrições dos ensaios, evidenciando os parâmetros medidos;

O Capítulo 6, “Apresentação e análise de resultados” são apresentados e analisados os resultados finais dos ensaios com e sem isolamento nas portas da sala de aula;

O Capítulo 7, “Comparação dos resultados obtidos” refere-se à comparação de alguns parâmetros acústicos obtidos com diferentes legislações e com uma sala da FEUP acusticamente tratada;

O Capítulo 8, “Sugestão de melhoria para a sala B024” refere-se a uma proposta de correção ao nível do teto da sala de aula, de modo a obter um tempo de reverberação menor e mais adequado para o fim a que esta se destina;

O Capítulo 9, “Conclusões e desenvolvimentos futuros” apresenta-se a conclusão unânime focando o interesse da adoção desta medida nas escolas e apresentam-se algumas propostas de trabalhos futuros mais aprofundados sobre o efeito da colmatação de frinchas em portas.

Este documento culmina com a listagem das referências bibliográficas.

## 2

## CONCEITOS E DEFINIÇÕES

### 2.1. SOM E RUÍDO

O fenómeno sonoro pode ser estudado por diferentes disciplinas que se encontram interligadas, nomeadamente, a acústica física e a psicoacústica.

A acústica física dedica-se ao estudo da parte material do fenómeno, os seus efeitos e interação com os meios sólido, líquido e gasoso. A psicoacústica refere-se ao estudo da perceção do fenómeno sonoro pelos sentidos.

O som é um fenómeno ondulatório, trata-se da vibração de um meio elástico que, uma vez estimulado transmite esse estímulo às partículas do meio circundante num certo espaço de tempo.

Para que este fenómeno se propague é necessário que três elementos se relacionem como um sistema (Figura 2.1).

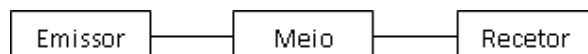


Figura 2.1 - Parâmetros necessários para que o som se propague

O emissor tem como função produzir uma perturbação no meio, que será entendido pelo recetor. O meio tem especial importância na qualidade da perturbação, pois afeta a maneira como esta se irá propagar. Estas perturbações originam variações de pressão e densidade segundo a direção de propagação, até chegarem ao recetor sonoro que, no caso do Homem, é o ouvido. Criam-se assim zonas de compressão (zonas de alta pressão) e rarefação (zonas de baixas pressões) que se propagam no espaço (Figura 2.2).

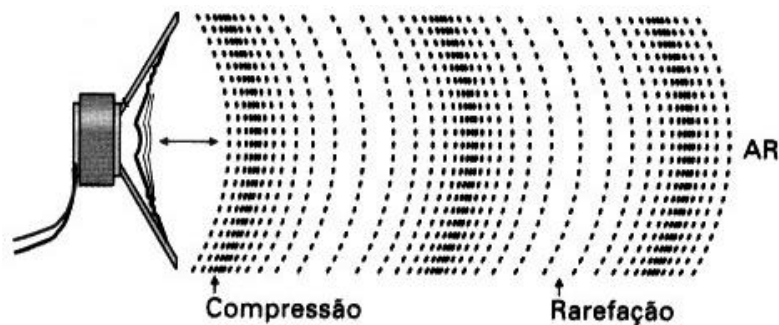


Figura 2.2 - Propagação do som no ar [2]

Este movimento resulta de ondas de pressão que se propagam por um determinado meio e podem ser, ondas longitudinais ou ondas transversais. As ondas longitudinais resultam da perturbação das moléculas ocorrer na mesma direção de propagação da onda e as ondas transversais quando a perturbação ocorre na direção perpendicular à direção de propagação da onda.

Em termos simples, os sons podem ser classificados como puros ou complexos. Os sons puros são sons com uma única componente em termos de frequência, enquanto os sons complexos são associados à sobreposição de dois ou mais sons puros cuja frequência varia ao longo do tempo.

Existem várias definições de ruído por este ser subjetivo. Isto porque o que o permite distinguir do conceito de som é a perturbação, que muitas vezes pode variar de um indivíduo para outro, de acordo com os fatores de tolerância de cada indivíduo. No entanto, o ruído é definido como um som desagradável ou indesejável.

O ruído forma-se devido à variação da pressão no meio de propagação das ondas. A colisão das partículas do meio, umas contra as outras, é a responsável pela propagação da variação de pressão. O resultado consiste num sinal complexo, sem uma frequência fundamental fixa e com um comportamento imprevisível, sendo portanto o ruído um sinal não periódico.

Entre som e ruído não existe uma diferença física, de uma forma geral a diferença entre eles reside no facto do resultado da vibração do meio material (sólido, líquido ou gasoso) tiver ou não significado auditivo. Com significado auditivo tem-se som e sem significado auditivo tem-se ruído.

## 2.2. PARÂMETROS BÁSICOS DO SOM

### 2.2.1. PRESSÃO SONORA

A pressão sonora consiste na diferença entre a pressão instantânea do ar, na presença de ondas sonoras, e a pressão atmosférica normal que, tem um valor aproximado de 101.400 Pa ( $\approx 10^5$  Pa). É esta variação muito pequena em torno da pressão atmosférica que os ouvidos conseguem captar (Figura 2.3).

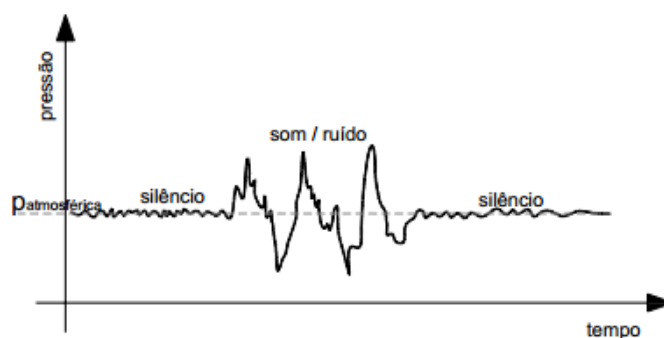


Figura 2.3 - Variação da pressão sonora no tempo [3]

A pressão, quantificada em pascal (Pa), exercida sobre a atmosfera determina o deslocamento máximo da partícula em relação ao seu centro de equilíbrio. Este deslocamento designa-se por amplitude (Figura 2.4).

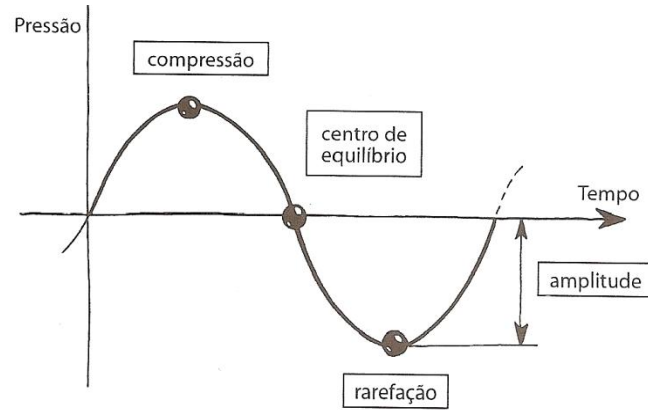


Figura 2.4 - Amplitude de uma onda sonora [4]

A pressão sonora de uma fonte pode variar entre  $20 \times 10^{-6}$  Pa até mais de 20 Pa. Estes dois valores de pressão representam a gama audível que varia entre uma pressão mínima de 20  $\mu$ Pa e uma pressão máxima de 20 Pa. O ouvido humano é muito sensível uma vez que a relação entre a pressão sonora característica de um som que cause dor e de um som que seja audível é da ordem de 1. 000.000.

O nível de pressão sonora é a medida mais usual quando se refere a amplitude de uma onda sonora por duas razões: por se tratar da quantidade simples a ser medida e pela sensibilidade do ouvido às variações de pressão, uma vez que o ouvido responde aos estímulos sonoros de forma quase logarítmica.

O valor da pressão sonora é expresso a partir dos seus níveis, considerado relativamente ao valor de referência. É assim expresso pelo logaritmo da razão, em decibéis, entre a pressão sonora e a pressão sonora de referência:

$$L_p = 20 \log \left( \frac{p}{p_0} \right) \quad (2.1)$$

Sendo:

$p$  – pressão sonora (Pa);

$p_0$  – pressão sonora de referência,  $2 \times 10^{-5}$  Pa.

Se existir uma variação de pressão de  $20 \times 10^{-6}$  Pa, ter-se-á um nível de pressão sonora de 0 dB. É de salientar que é possível obter resultados negativos, porém não são detetados pelo ouvido humano.

Os sonómetros são utilizados para medição da pressão sonora eficaz ou a RMS (*root mean square*) (Figura 2.5). A pressão eficaz é um valor “médio” atingido pela pressão do ar entre dois instantes diferentes,  $t_1$  e  $t_2$ .

$$p_{ef}^2 = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} p^2(t) dt \quad (2.2)$$

Para somar várias fontes de pressão sonora, existentes no ambiente, é necessário determinar a pressão sonora global a partir da seguinte expressão:

$$L_{soma} = 10 \times \log \left( \sum_{i=1}^N 10^{\frac{L_i}{10}} \right) \quad (2.3)$$

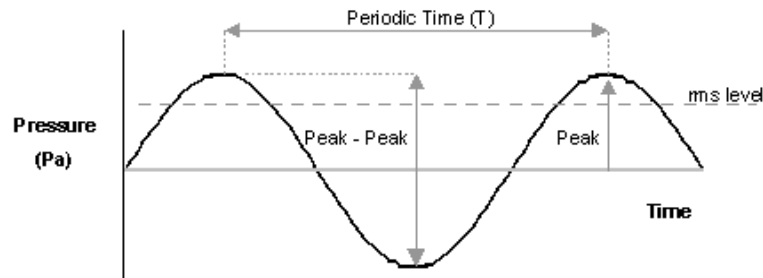


Figura 2.5 - Pressão eficaz (RMS) [5]

### 2.2.2. POTÊNCIA SONORA

A potência sonora é uma característica da fonte e não do estímulo gerado por essa mesma fonte numa dada direção ou ponto. É caracterizada como sendo a energia total que num segundo atravessa uma esfera fictícia de raio qualquer centrada na fonte e quantifica-se em watt ou joule/s, pois, geralmente o que interessa é a quantidade de energia transferida por unidade de tempo. A energia de uma onda sonora é a quantidade de som nela presente.

O valor da potência sonora é expresso em termos dos seus níveis, considerado relativamente ao valor de referência. O nível de potência sonora é a potência sonora total irradiada pela fonte sonora em todas as direções. É expresso pelo logaritmo da razão, em decibéis, entre a potência sonora real e a potência sonora de referência:

$$L_w = 20 \log \left( \frac{W}{W_0} \right) \quad (2.4)$$

Sendo:

$W$  – potência sonora (W);

$W_0$  – potência sonora de referência,  $10^{-12}$  W.

### 2.2.3. INTENSIDADE SONORA

O som é uma quantidade tridimensional, por isso é necessário ter em conta a área quando se refere a transmissão de energia, isto é, definir uma quantidade em termos de watts por unidade de área. Essa quantidade designa-se por intensidade sonora, que se refere a uma dada quantidade de densidade da potência de um som propagado numa direção particular. Permite avaliar a componente direcional do som, passando este a ser representado por uma grandeza vetorial.

A intensidade sonora é calculada de acordo com a seguinte expressão:

$$I = \frac{W}{4\pi r^2} = \frac{p^2}{\rho \cdot c} \quad (2.5)$$

Sendo:

$I$  – intensidade sonora ( $W/m^2$ );

$W$  – potência sonora (W);

$r$  – distância emissor-recetor (m);

$p$  – pressão sonora (Pa);

$\rho$  – massa volúmica (ar  $\approx 1,2$  kg/m<sup>3</sup>);

$c$  – celeridade (m/s).

De acordo com a expressão 2.5 é possível verificar que a potência sonora ( $W$ ) é proporcional à intensidade sonora ( $I$ ) e é proporcional ao quadrado da pressão sonora ( $p$ ).

De igual modo verifica-se que a intensidade sonora diminui com a distância à fonte sonora, caso a distância aumente para o dobro a intensidade sonora diminui para um quarto ( $I_2=I_1/4$ ), cf. Figura 2.6.

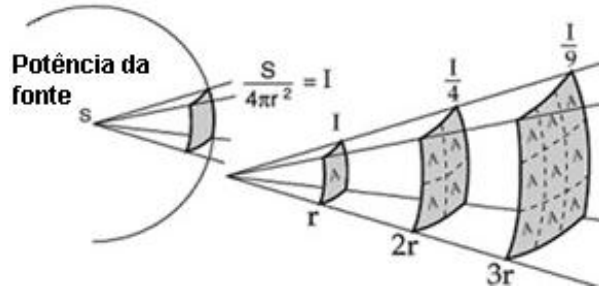


Figura 2.6 - Relação da intensidade sonora com a distância à fonte [Adaptado de 6]

A massa volúmica apresentada na expressão 2.5 é referente à massa volúmica do ar, uma vez que no caso em estudo é dada especial atenção aos sons propagados no ar. A celeridade é uma grandeza que depende da temperatura (em graus kelvin) do meio onde a onda sonora se propaga. É calculada pela seguinte expressão:

$$c = 20,045\sqrt{T} \quad (2.6)$$

Com  $T$  (K) =  $273,15 + \theta$  (°C).

Quadro 2.1 - Velocidade de propagação das ondas sonoras em diferentes meios de propagação [7]

Meio de propagação	Velocidade (m/s)
Ar (20 °C)	343
Dióxido de carbono (0 °C)	258
Oxigénio	317
Hélio (20 °C)	927
Álcool etílico	1180
Chumbo	1200
Hidrogénio (0 °C)	1270
Mercúrio	1450
Água (20 °C)	1480
Borracha	1500
Água do mar	1522
Latão	3500
Cobre	3900
Alumínio	4420
Betão	5000
Aço	6000
Madeira	Entre 20 $\mu$ Pa e 20 Pa

O nível de intensidade sonora é dado pela seguinte expressão:

$$L_I = 10 \log \left( \frac{I}{I_0} \right) \quad (2.7)$$

Sendo:

$I$  – intensidade sonora ( $\text{W/m}^2$ );

$I_0$  – intensidade sonora de referência,  $10^{-12}$  ( $\text{W/m}^2$ ).

No ar o nível de pressão sonora é idêntico ao nível de intensidade sonora (o erro é inferior a 0,2 dB em situações correntes e depende da temperatura).

Quadro 2.2 - Exemplos de níveis de potência sonora e a correspondente pressão e intensidade sonora [8]

Fontes de som/ruído	Níveis de potência sonora (dB)	Pressão sonora (Pa)	Intensidade sonora ( $\text{W/m}^2$ )
Aviões a jato (50 m)	140	200	100
Limiar da dor	130	63,2	10
Limiar de desconforto	120	20	1
Serra elétrica (1 m)	110	6,3	0,1
Discoteca (1 m)	100	2	0,01
Camião a diesel (10 m)	90	0,63	0,001
Berma de estrada	80	0,2	0,000 1
Aspirador (1 m)	70	0,063	0,000 01
Conversa normal (1m)	60	0,02	0,000 001
Casa normal	50	0,0063	0,000 000 1
Biblioteca em silêncio	40	0,002	0,00000001
Quarto silencioso à noite	30	0,00063	0,000 000 001
Estúdio de TV em silêncio	20	0,0002	0,000 000 000 1
Som das folhas à distância	10	0,000 063	0,000 000 000 01
Limiar auditivo	0	0,000 02	0,000 000 000 001

### 2.3. FREQUÊNCIA

A frequência é uma característica bastante importante do som. É a partir da frequência que o ouvido distingue se um som é agudo ou grave.

Esta característica do som encontra-se relacionada com o número de ciclos completos (vibrações) de uma onda sonora, que ocorrem durante um segundo e é expressa em hertz (Hz).



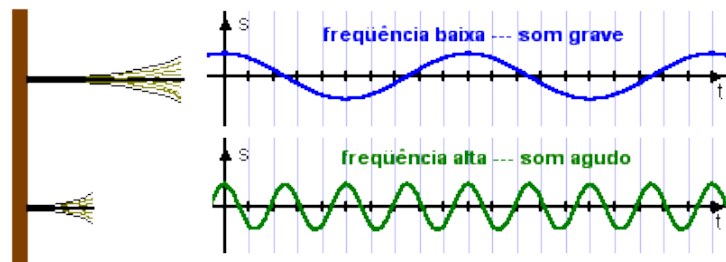


Figura 2.7 - Frequências do som [9]

Na Figura 2.7 é possível observar a representação de dois sons. Um som com ciclos mais compridos e em menor quantidade, com uma frequência mais baixa que se designa por som grave e um som com ciclos de menor comprimento e em maior quantidade e portanto uma frequência mais elevada que se designa por som agudo.

A gama audível representa a variação em frequência para a qual o ouvido humano é sensível, e varia entre 20 Hz e 20 kHz. As ondas sonoras com frequências inferiores aos 20 Hz são denominadas por infrasons e as ondas sonoras com frequências superiores a 20.000 Hz são denominadas por ultrasons (Figura 2.8).

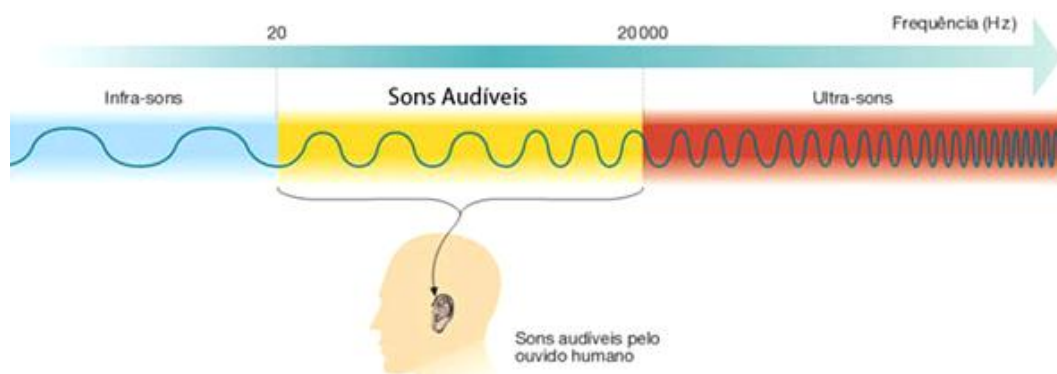


Figura 2.8 - Espectro sonoro [10]

Uma vez que a análise detalhada por cada uma das centenas ou milhares de frequências seria muito trabalhosa, separaram-se os ruídos por “bandas” de frequência de dimensão normalizada. Uma “banda” consiste num agrupamento de frequências com um limite inferior ( $f_1$ ), um limite superior ( $f_2$ ) e com uma frequência central ( $f_0$ ) (Figura 2.9).

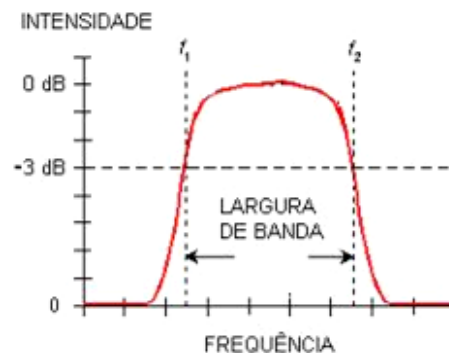


Figura 2.9 - Definição prática de banda de frequência [11]

Sendo  $f_1$  e  $f_2$  as frequências limites de uma dada “banda”, com uma frequência central  $f_0$ , tem-se:

$$\frac{f_0}{f_1} = \frac{f_2}{f_0} \Rightarrow f_0 = \sqrt{f_2 f_1} \quad (2.8)$$

Existem duas larguras de banda, em que  $f_2/f_1$  assume os valores 2 e  $2^{1/3}$ . Estas bandas são designadas respetivamente por, bandas de oitava e bandas de um terço de oitava.

A largura de cada banda é dada por,

$$\Delta f = f_2 - f_1 \quad (2.9)$$

Os limites inferior e superior para cada banda  $1/n$  de oitava podem ser obtidos da seguinte forma,

$$f_1 = 2^{-\frac{1}{2n}} f_0 \quad (2.10)$$

$$f_2 = 2^{\frac{1}{2n}} f_0 \quad (2.11)$$

Sendo:

$f_0$  – frequência central da banda (Hz);

$f_1$  – frequência inferior da banda  $f_0$  (Hz);

$f_2$  – frequência superior da banda  $f_0$  (Hz);

$n$  – constante (=1 para bandas de oitava e = 3 para bandas de um terço de oitava).

Os valores de 1/1 oitava normalizados no domínio do audível são: 16, 31, 63, 125, 250, 500, 1k, 2k, 4k, 8k e 16k Hz. Relativamente aos valores de 1/3 oitava são: 20, 25, 31, 40, 50, 63, 80, 100, 125, 160, 200, 250, 315, 400, 500, 630, 800, 1k, 1.250, 1.600, 2k, 2.500, 3.150, 4k, 5k, 6.300, 8k, 10k, 12.500, 16k e 20k. Segundo a norma EN 140 [54] na acústica de edifícios apenas se utilizam os valores de cinco bandas de oitava, nomeadamente, 125, 250, 500, 1k e 2k Hz.

## 2.4. FONTES DE RUÍDO

As fontes sonoras são muito variáveis, porém serão aqui consideradas apenas as fontes sonoras ideais mais simples, tais como a fonte pontual, a fonte linear, e a fonte plana. O conhecimento de fontes sonoras mais complexas parte do estudo das fontes sonoras anteriormente mencionadas, isto é, qualquer tipo de fonte sonora parte destes três tipos de fontes.

Uma fonte pontual tem origem num único ponto do espaço e a energia transferida para as partículas de ar adjacentes processa-se segundo uma propagação radial, por ondas esféricas. Este tipo de fonte é caracterizada pela diminuição da pressão quando a distância à fonte aumenta para o dobro. Com uma diminuição de 6 dB (Figura 2.10).

$$r \rightarrow 2r \Rightarrow p \rightarrow \frac{p}{2} \Rightarrow L \rightarrow L - 6 \text{ dB} \quad (2.12)$$

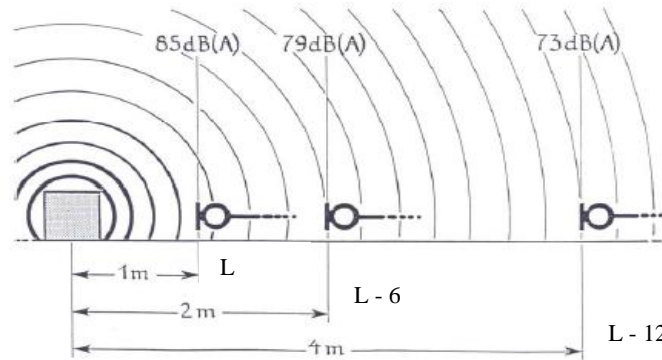


Figura 2.10 - Diminuição do nível sonoro com o aumento da distância à fonte para uma fonte pontual [12]

Uma fonte linear caracteriza-se pelo ruído se propagar em superfícies hemicilíndricas, que envolvem a fonte, com igual nível de pressão sonora. Com um aumento da distância à fonte para o dobro, a pressão sonora diminui 3 dB (Figura 2.11).

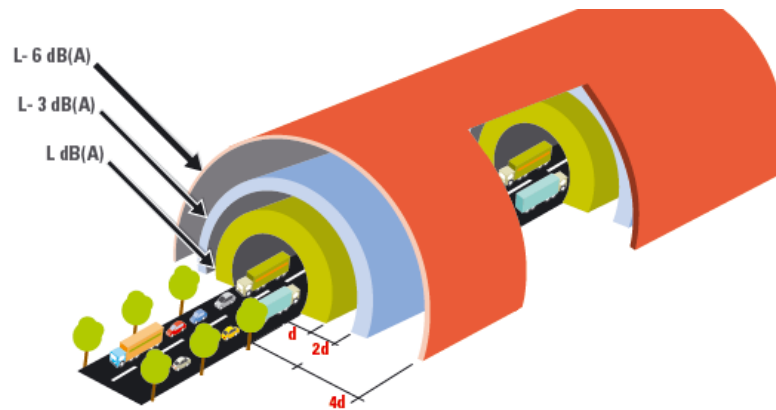


Figura 2.11 - Diminuição do nível sonoro com o aumento da distância à fonte para uma fonte linear [13]

$$r \rightarrow 2r \Rightarrow L \rightarrow L - 3 \text{ dB} \quad (2.13)$$

Uma fonte plana é a menos usual, é aquela em que a frente de onda apresenta uma área constante com o aumento da distância à fonte, resultando assim um nível sonoro constante independentemente da distância à fonte.

$$r \rightarrow 2r \Rightarrow L \rightarrow L \quad (2.14)$$

## 2.5. OUVIDO HUMANO

O ouvido humano é o responsável pelo sentido auditivo. O som é a agitação de partículas, essa agitação propaga-se desde a fonte sonora até ao ouvido. O ouvido humano pode ser dividido em três partes consoante a função desempenhada e a sua localização: o ouvido externo (pavilhão auricular, canal auditivo e tímpano), o ouvido médio (ossículos: martelo, bigorna e estribo) e o ouvido interno (cóclea) (Figura 2.12).

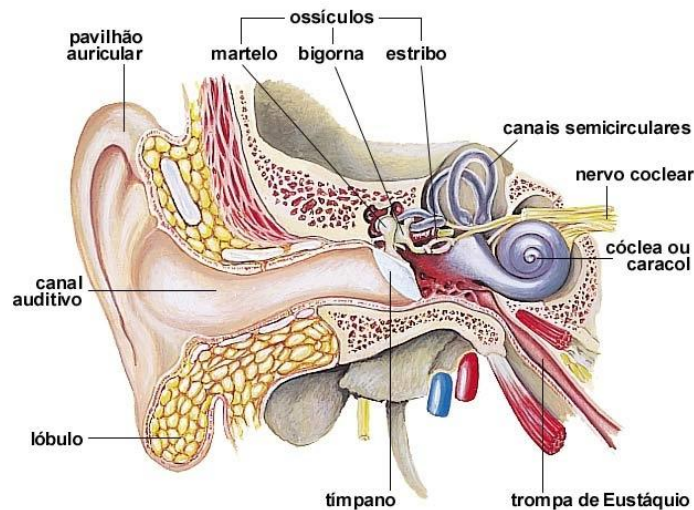


Figura 2.12 - Esquema do ouvido humano [14]

As ondas sonoras são recebidas pelo pavilhão auricular e encaminhadas através do canal auditivo através da vibração do tímpano (pequena membrana que separa o ouvido externo do interno) até ao ouvido interno.

As vibrações vão então ser transmitidas para o interior da cóclea através dos ossículos: martelo, bigorna e o estribo, ligados em cadeia entre o tímpano e a janela oval (Figura 2.13).

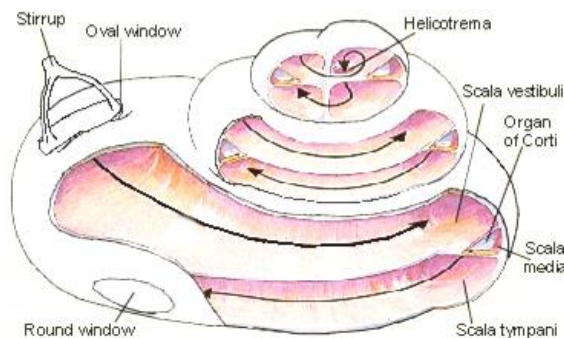


Figura 2.13 - Esquema da cóclea humana [15]

Os ossículos têm como função a amplificação das vibrações. Estes funcionam como uma alavanca, aumentando a pressão sonora. O estribo transmite a vibração à janela oval 17 vezes mais pequena, tendo por isso que aumentar a pressão sonora resultando portanto num aumento da pressão sonora global de 22 vezes. Deste modo é possível obter a agitação necessária no interior da cóclea para que as células ciliadas do ouvido interno possam identificar as frequências que compõem um certo som e transmitir essa informação ao cérebro, sendo aí interpretada. A onda de pressão sonora que se propaga primeiro no ar e depois num fluído acabando na forma de impulsos elétricos que o cérebro utiliza para construir a imagem sonora correspondente.

Caso o tempo de exposição e os níveis de pressão sonora sejam elevados as células ciliadas, que se localizam na membrana basilar e culminam nos cílios, podem ficar irremediavelmente danificadas (Figura 2.14). As perdas auditivas podem ir desde perdas auditivas ligeiras até à surdez total.



Figura 2.14 - Esquema de células ciliadas danificadas [16]

O ouvido humano tem uma sensibilidade auditiva variável em frequência. Os estímulos de baixas frequências, que fazem reagir os cílios em todo o comprimento da membrana basilar, não são bem detetados pelo ouvido humano, pelo contrário os estímulos de altas frequências, que fazem reagir os cílios apenas na zona inicial, são facilmente detetados pelo ouvido (Figura 2.15). Logo, os primeiros cílios a partirem-se e por isso a primeira perda de audição corresponde à gama das altas frequências.

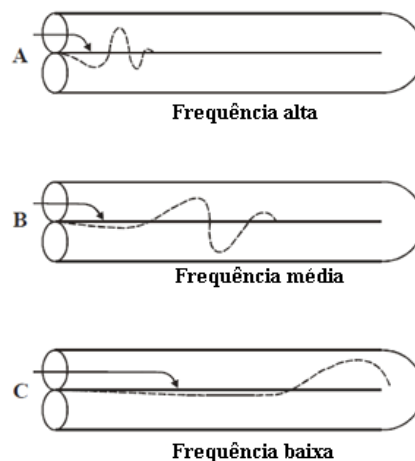


Figura 2.15 - Ondas sonoras ao longo da membrana basilar [Adaptado de17]

A variação de sensibilidade do ouvido humano é dependente da intensidade sonora do próprio som. Para baixas frequências, o aparelho auditivo apenas começa a ouvir para valores de intensidade sonora mais elevados. O ouvido torna-se mais sensível ao som à medida que se avança na gama de frequências de emissão.

Deste modo surgem as curvas de igual percepção subjetiva da intensidade sonora (Figura 2.16) que são escalonadas com a unidade designada por *fone*. Uma alteração de intensidade de 10 *fone* duplica ou reduz a metade o valor de intensidade sonora captada pelo ouvido. Analisando as curvas de igual sensibilidade auditiva é possível verificar que para uma intensidade de 10 dB a uma frequência de 1000 Hz e para uma diferença de 10 *fone* tem-se uma intensidade de 20 dB.

Para avaliar a resposta do ouvido humano, em termos de interpretação que este faz do ruído, são usadas as chamadas curvas de ponderação A, B, C e D (Figura 2.17). A curva de ponderação mais usada é a curva A.

O filtro A foi pensado inicialmente para aproximar à resposta humana os ruídos de fraca intensidade. Por este motivo este filtro é sensivelmente o inverso da curva dos 40 *fone*. As curvas B e C seriam utilizadas para ruídos um pouco mais intensos, respetivamente entre os 55 e os 85 dB e superior a 85

dB. Porém, a curva B caiu em desuso e foi substituída pela curva A, que atualmente é quase universalmente aceita.

Deste modo, o nível sonoro em dB(A) é a tradução global num só valor da energia acústica de um ruído filtrado por uma curva de ponderação do tipo A. Aos valores captados dos níveis de pressão sonora em dB (linear) adicionam-se algebricamente as ponderações (Quadro 2.3), de seguida somam-se cada um dos valores logaritmicamente, obtendo-se assim o nível sonoro em dB(A) do ruído em análise.

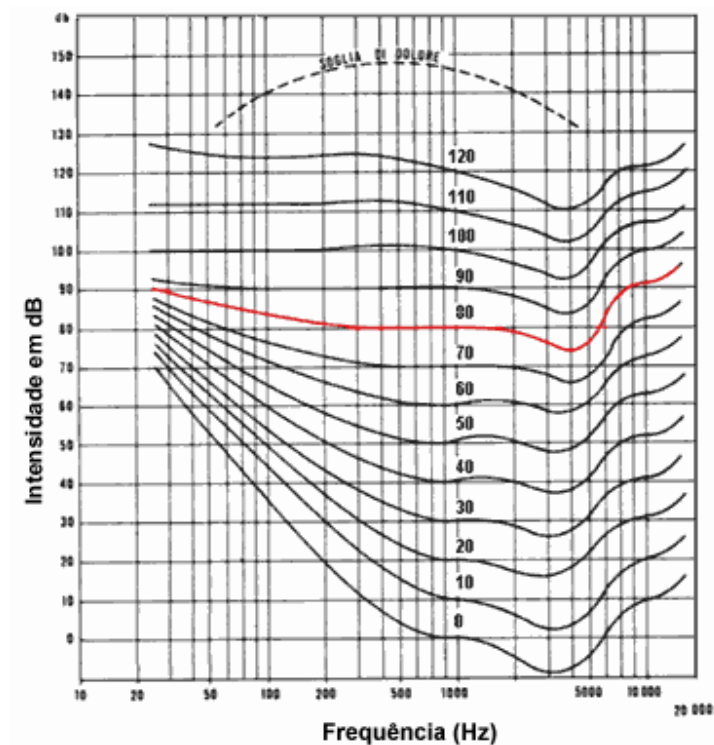


Figura 2.16 - Curvas de igual sensibilidade auditiva (em fone), segundo ISO 226 [18]

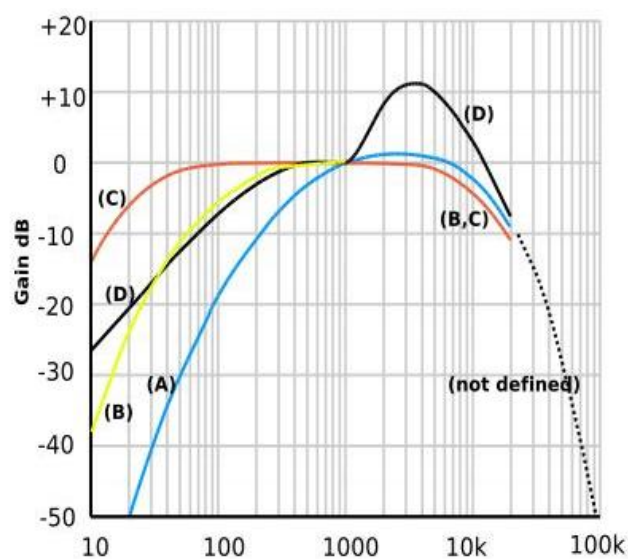


Figura 2.17 - Curvas de ponderação A, B, C e D [19]

Quadro 2.3 - Valores numéricos das ponderações da curva A para bandas de frequência 1/1 e 1/3 de oitava na gama audível [1]

Banda de frequência (Hz)	Ponderação A para 1/3 de oitava	Ponderação A para 1/1 de oitava	Banda de frequência (Hz)	Ponderação A para 1/3 de oitava	Ponderação A para 1/1 de oitava
25	-44,7		800	-0,8	
<b>31</b>	-39,4	<b>-40</b>	<b>1.000</b>	0	<b>0</b>
40	-34,6		1.250	0,6	
50	-30,2		1.600	1,0	
<b>63</b>	-26,2	<b>-26</b>	<b>2.000</b>	1,2	<b>+1</b>
80	-22,5		2.500	1,3	
100	-19,1		3.125	1,2	
<b>125</b>	-16,1	<b>-15,5</b>	<b>4.000</b>	1,0	<b>+1</b>
160	-13,4		5.000	0,5	
200	-10,9		6.300	-0,1	
<b>250</b>	-8,6	<b>-8,5</b>	<b>8.000</b>	-1,1	<b>-1</b>
315	-6,6		10.000	-2,5	
400	-4,8		12.500	-4,3	
<b>500</b>	-3,2	<b>-3</b>	<b>16.000</b>	-6,6	<b>-7</b>
630	-1,9		20.000	-9,3	

## 2.6. FENÓMENOS DE REFLEXÃO, DIFUSÃO, DIFRAÇÃO E REFRAÇÃO

### 2.6.1. REFLEXÃO

O fenómeno de reflexão consiste na mudança de direção da propagação da energia sonora, através do retorno da energia que incide num dado objeto em direção à região de onde teve origem (Figura 2.18). A reflexão de uma dada superfície é diretamente proporcional à dureza do material. As paredes de betão, mármore, azulejos, entre outros materiais, refletem quase 100% da energia sonora incidente.

O ouvido humano apenas consegue distinguir dois sons que chegam até ele com um intervalo de tempo superior a 50 ms. Caso em algum ponto da sala a diferença entre som direto e som refletido seja muito grande a audição será confusa.

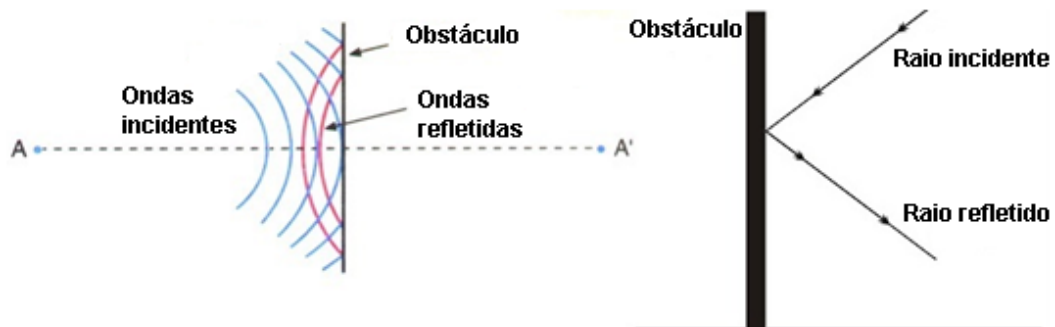


Figura 2.18 - Energia sonora refletida [Adaptado de 20]



### 2.6.2. DIFUSÃO

Uma superfície difusora é aquela que possui irregularidades com algum relevo e reflete em todas as direções, espalhando as ondas sonoras por todo o ambiente num efeito de dispersão (Figura 2.19). O tamanho desses relevos condiciona as frequências de onda sonora que são refletidas. Uma superfície com pequenos relevos só será difusa para altas frequências.

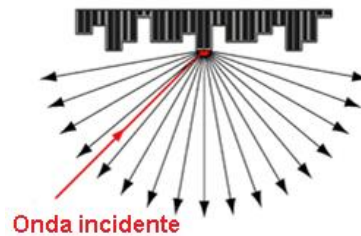


Figura 2.19 - Dispersão sonora das reflexões em difusão [Adaptado de 21]

### 2.6.3. DIFRAÇÃO

A difração consiste no “contorno” junto aos limites dos obstáculos por uma onda sonora, quando estes possuem uma dimensão finita (Figura 2.20). Este fenómeno é frequentemente encontrado em barreiras acústicas colocadas no exterior.

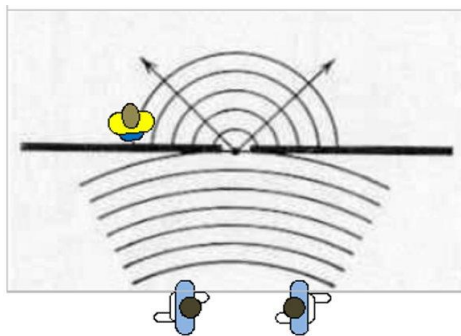


Figura 2.20 - Exemplo de difração sonora [22]

### 2.6.4. REFRAÇÃO

A refração sonora ocorre quando a velocidade de uma onda sonora é alterada., isto é, quando um som muda de direção de propagação devido a passar de um meio material para outro (Figura 2.21). A refração deve-se essencialmente à diferença da constituição interna dos diferentes meios materiais.

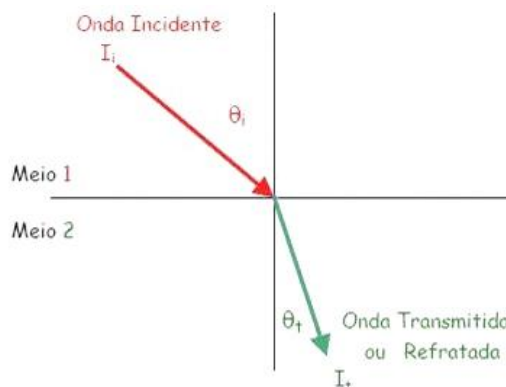


Figura 2.21 - Exemplo do fenómeno de refração entre dois meios diferentes [23]



## 2.7. SOM DIRETO E SOM REVERBERADO

O som emitido por uma fonte sonora pode atingir um ouvinte diretamente (som direto) ou após ter chocado com as superfícies da sala (som refletido) (Figura 2.22).

Para que uma sala tenha uma boa acústica é necessário que o som direto e o som reverberado sejam adequados. Caso o som direto seja demasiado fraco pode ser mascarado por ruídos existentes, e por outro lado, se for demasiado forte pode ser incomodativo de se ouvir. O som reverberado aumenta o nível do ruído ambiente e a sonoridade ambiente, é portanto, um fator importante a considerar no projeto acústico de um espaço onde a comunicação seja o objetivo primordial.

Numa sala com superfícies refletoras a energia sonora será refletida e será criado um campo sonoro uniforme. Uma sala com estas condições toma a designação de “reverberante”. Por outro lado, uma sala com superfícies muito absorventes, em que a maioria da energia radiante da fonte sonora é absorvida por essas superfícies toma a designação de “seca”.

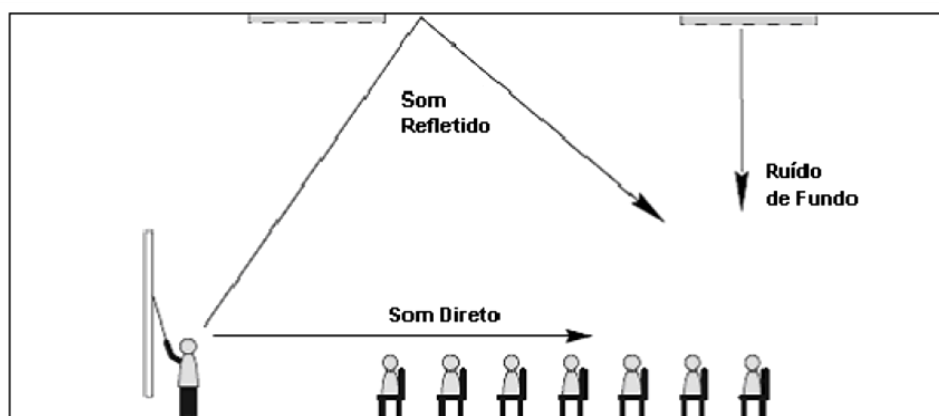


Figura 2.22 - Caso típico de uma sala de aula [Adaptado de 24]

## 2.8. ABSORÇÃO SONORA

### 2.8.1. DEFINIÇÕES

O fenómeno de absorção ocorre quando uma superfície absorve a energia das ondas sonoras nela incidentes. A absorção sonora do material depende das propriedades do material e da frequência.

A quantificação de absorção sonora pode ser obtida a partir da seguinte expressão:

$$A_i = \sum S_i \times \alpha_i \quad (2.15)$$

Sendo:

$A$  – absorção sonora do material ( $m^2$ );

$S$  – área da superfície do material exposto ( $m^2$ );

$\alpha$  – coeficiente de absorção sonora, do material exposto.

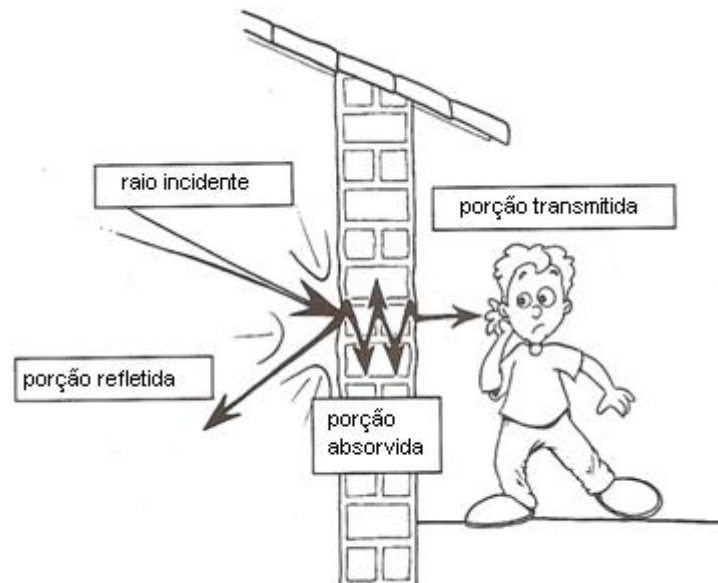


Figura 2.23 - Propagação do som [25]

O coeficiente de absorção sonora ( $\alpha$ ) é a relação entre a energia sonora absorvida por essa superfície e a energia sonora que atinge uma dada superfície (Equação 2.16). A energia incidente numa superfície pode ser refletida, absorvida ou transmitida (Figura 2.23).

$$\alpha = \frac{E_{\text{Absorvida}}}{E_{\text{Incidente}}} \quad (2.16)$$

O valor do coeficiente de absorção sonora para um dado material pode variar entre 0 e 1 e depende do ângulo de incidência e da frequência do som incidente (Figura 2.24). Por exemplo uma janela aberta terá, teoricamente, um valor do coeficiente de absorção sonora unitário, isto é, toda a energia incidente será absorvida, enquanto uma parede de betão terá um valor do coeficiente de absorção sonora muito próximo de zero isto porque a maioria da energia sonora incidente na superfície será refletida.

É usual aparecer (em especial nos EUA e Canadá) o parâmetro NRC (*noise reduction coefficient*), que se define de acordo com a Equação 2.17, cf. ASTM C423 [53], o seu valor é apresentado arredondado para o múltiplo mais próximo de 0,05.

$$NRC = \frac{(\alpha_{250} + \alpha_{500} + \alpha_{1000} + \alpha_{2000})}{4} \quad (2.17)$$

Sendo:

NRC - *noise reduction coefficient*;

$\alpha_i$  – coeficiente de absorção sonora na frequência de banda de 1/1 oitava centrada em i (dB).

O mobiliário e as pessoas presentes no interior dos espaços possuem características de absorção sonora que devem ser ponderadas na análise do respetivo campo sonoro. A absorção sonora é assim uma característica de todos os materiais e elementos construtivos.

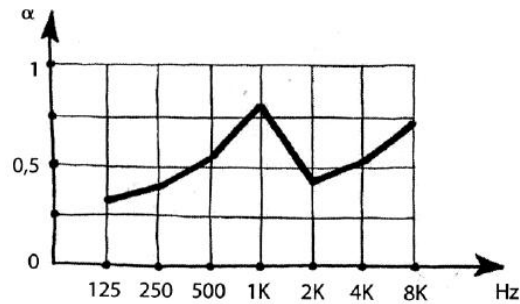


Figura 2.24 - Variação do coeficiente de absorção de um dado material com a frequência [4]

O parâmetro mais completo é o coeficiente de absorção médio ponderado ( $\alpha_w$ ), cf. norma EN ISO 11654 [52], que se obtém por ajuste ponderado de uma curva de referência usando bandas de oitava dos 250 aos 4000 Hz. O valor de  $\alpha_w$  é o valor lido para os 500 Hz na curva ajustada de modo a que a soma dos desvios positivos seja a mais elevada possível sem ultrapassar os 0,10.

## 2.8.2. MATERIAIS ABSORVENTES

### 2.8.2.1. CONCEITOS

Os materiais absorventes podem agrupar-se em três categorias em função das suas características:

- Porosos e fibrosos;
- Ressonadores;
- Membranas.

Cada um destes materiais atua em gamas distintas de frequências (Figura 2.25). As membranas são mais eficazes para baixas frequências, os ressonadores nas médias e os porosos e fibrosos nas altas frequências.

Para além dos materiais absorventes referidos é necessário considerar o ar, que também é um absorvente sonoro para algumas frequências.

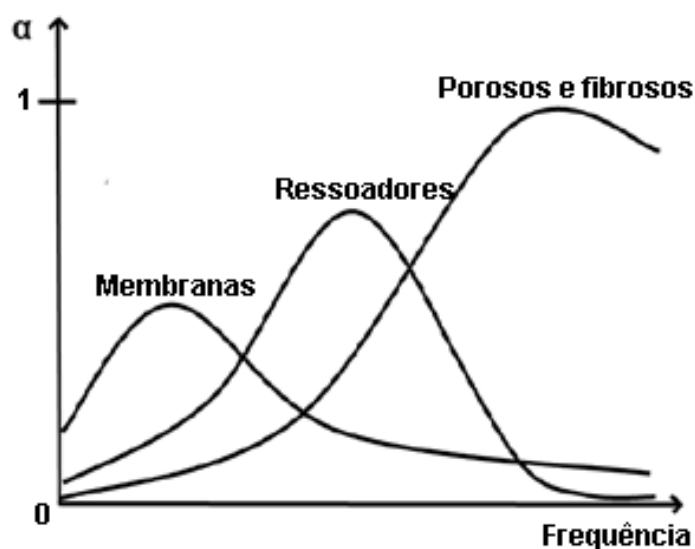


Figura 2.25 - Comportamento em frequência dos diferentes tipos de materiais absorventes [Adaptado de 1]

### 2.8.2.2. MATERIAIS POROSOS E FIBROSOS

Os materiais porosos e fibrosos são mais eficazes na absorção sonora em altas frequências. Estes materiais transformam a energia em calor devido ao movimento de fricção do ar nos poros e interstícios, provocado pela incidência das ondas sonoras neste tipo de materiais.

Existem diferentes tipos de materiais dependendo das suas características físicas, sendo eles [1]:

- Tecidos e alcatifas

O comportamento acústico das alcatifas depende da sua espessura, quanto maior a espessura maior será a sua eficácia. Os tecidos têm o seu comportamento acústico dependente do seu peso específico.

- Massas porosas (para projeção)

Este tipo de material apresenta uma massa específica de  $150 (\pm 15) \text{ kg/m}^3$  e tem um ótimo comportamento acústico.

- Aglomerados de fibras de madeira

São materiais que apresentam um comportamento acústico razoável.

- Fibras minerais

A absorção sonora deste tipo de material depende da sua espessura, densidade e largura da caixa-de-ar existente (Figura 2.26). Com o aumento da espessura destes materiais aumenta a absorção sonora nas baixas frequências o que torna este tipo de material, um bom absorvente em todas as gamas de frequência.

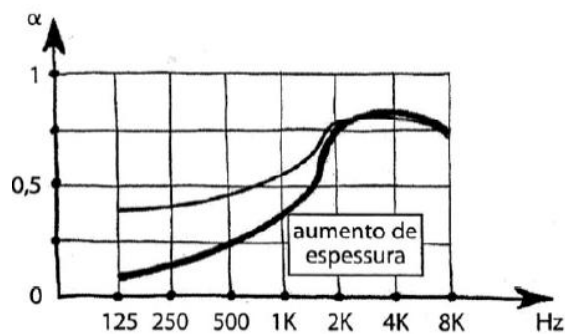


Figura 2.26 - Aumento da absorção sonora nas baixas frequências num material fibroso [4]

- Materiais plásticos

Os materiais plásticos mais utilizados são: o poliuretano expandido e as espumas flexíveis de poliuretano.

- Aglomerados de cortiça

Existem dois tipos de aglomerado de cortiça sendo eles o aglomerado negro e o aglomerado composto de cortiça. Destes dois tipos apenas o aglomerado negro de cortiça é considerado como um bom absorvente sonoro, uma vez que o aglomerado composto de cortiça não atinge os valores do coeficiente de absorção mínimos desejados.

### 2.8.2.3. RESSOADORES

O ressoador ou ressoador de *Helmholtz* é um sistema constituído por uma cavidade de ar confinado, ligado ao ambiente através de uma abertura estreita (gargalo) (Figura 2.27).

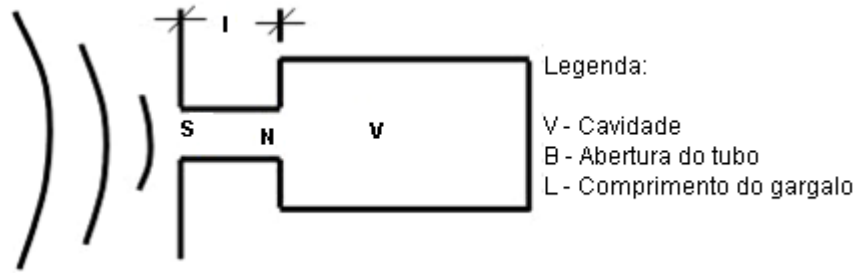


Figura 2.27 - Representação esquemática de um ressoador [Adaptado de 26]

É um sistema utilizado na absorção em médias frequências sendo a sua frequência de ressonância para uma eficácia máxima obtida de acordo com a seguinte expressão:

$$f = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{V(l+1,6r)}} \quad (2.18)$$

Sendo:

$c$  – celeridade do ar (m/s);

$S$  – área do orifício de entrada (gargalo) (m<sup>2</sup>);

$V$  – volume da cavidade interior (m<sup>3</sup>);

$l$  – comprimento do gargalo (m);

$r$  – raio do orifício de entrada (gargalo) (m).

Em edifícios correntes as soluções de absorção sonora utilizadas com base neste tipo de sistema não se baseiam num único elemento ressoador isolado mas sim num conjunto de ressoadores agrupados, como por exemplo os tetos falsos perfurados (Figura 2.28).

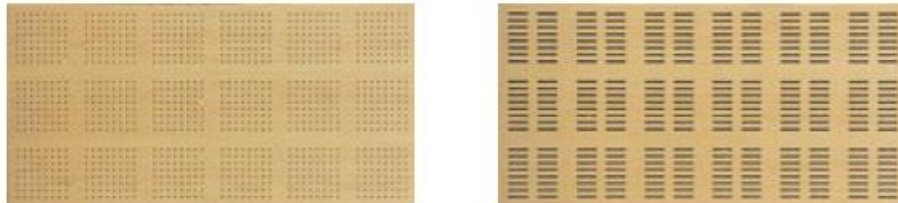


Figura 2.28 - Exemplo de ressoadores agrupados [4]

A frequência dos ressoadores agrupados, geralmente materializados à base de aberturas circulares, para uma eficácia de absorção máxima é obtida da seguinte forma:

$$f = \frac{10 \cdot c}{2\pi} \sqrt{\frac{P}{(e+1,6r)d}} \quad (2.19)$$

(Validade:  $f < 3400$  Hz.cm)

Sendo:

$c$  – celeridade do ar (m/s);

$P$  – percentagem de área perfurada (%);

$r$  – raio de cada perfuração (cm);

$e$  – espessura da placa perfurada (cm);

$d$  – largura da caixa-de-ar (cm).

#### 2.8.2.4. MEMBRANAS

As membranas são sistemas constituídos por um fino painel apoiado numa estrutura intermédia fixada num elemento rígido e com espaço de ar no tardo, que poderá ser preenchido parcial ou totalmente por material absorvente (Figura 2.29).

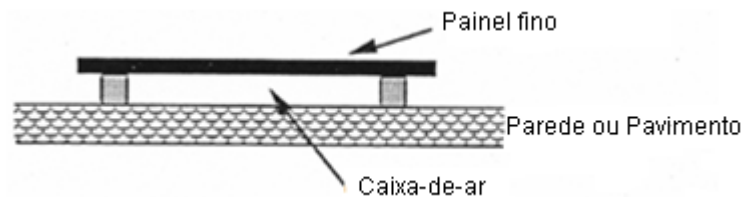


Figura 2.29 - Representação esquemática de uma membrana [Adaptado de 4]

A onda sonora incidente no painel provocará a vibração deste que por sua vez irá originar a compressão e a tração do ar existente na caixa-de-ar. Caso a frequência da onda sonora incidente seja próxima da frequência de ressonância do sistema massa-mola, constituído pelo painel e pela caixa-de-ar, a absorção será máxima.

As membranas são sistemas com maior eficácia nas baixas frequências, cuja frequência de eficácia máxima pode ser obtida pela seguinte expressão:

$$f = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho}{m \cdot d}} \cong \frac{60}{\sqrt{m \cdot d}} \quad (2.20)$$

Sendo:

$c$  – celeridade do ar (m/s);

$m$  – massa superficial ( $\text{kg/m}^2$ );

$\rho$  – massa volúmica do ar ( $\text{kg/m}^3$ );

$d$  – espessura da caixa-de-ar (m).

#### 2.8.2.5. ABSORÇÃO DO AR

A absorção sonora do ar depende da humidade e da temperatura dos espaços. Para bandas de frequência de 1/1 oitava inferiores à banda centrada nos 1000 Hz e para espaços com um volume inferior aos 200  $\text{m}^3$ , a absorção sonora do ar é desprezável.

Quando as condições de humidade relativa e temperatura interior dos espaços não são discriminadas ou conhecidas, recomenda-se a utilização dos valores seguintes:

- Temperatura interior igual a 20 °C;
- Humidade relativa compreendida entre 50 % e 70 %.

Quadro 2.4 - Valores da absorção sonora ( $\text{m}^{-1}$ ) do ar em função da frequência e humidade relativa [1]

HR (%)	< 1 kHz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz	16 kHz
0	0	0	0	0	0	0
20	0	0,008	0,016	0,056	0,188	0,34
40	0	0,004	0,008	0,044	0,096	0,21
60	0	0,003	0,004	0,028	0,064	0,14
80	0	0,002	0,004	0,008	0,052	0,11

## 2.9. ISOLAMENTO SONORO A RUÍDOS AÉREOS

Quando a emissão e propagação do ruído se processa unicamente através da vibração do ar por excitação de uma fonte sonora, trata-se de um problema de isolamento sonoro a ruídos de condução aérea.

Quando uma onda sonora incide numa superfície, parte da sua energia é refletida e a restante transmitida para o elemento recetor com a vibração do elemento construtivo (Figura 2.30). O isolamento a ruídos de condução aérea consiste assim na capacidade de dissipação da energia incidente no elemento construtivo.

Os ruídos de condução aérea podem ter origem no exterior (circulação rodoviária, ferroviária, aérea, instalações industriais e de diversão pública) ou no interior do edifício (solicitações associadas à utilização do edifício pelos ocupantes e pelos equipamentos existentes).

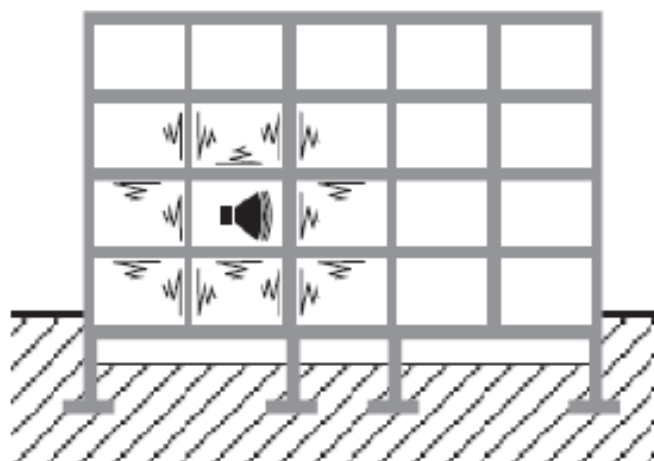


Figura 2.30 - Esquema de transmissão de ruídos aéreos [4]

No processo de transmissão sonora entre dois locais é necessário distinguir entre transmissão direta e transmissão marginal (Figura 2.31):

- Transmissão direta: ocorre diretamente através do elemento de separação (através de juntas, fendas, descontinuidades do elemento de construção ou por vibração do próprio elemento);
- Transmissão marginal: verifica-se o contorno através de elementos interligados ao elemento de separação.

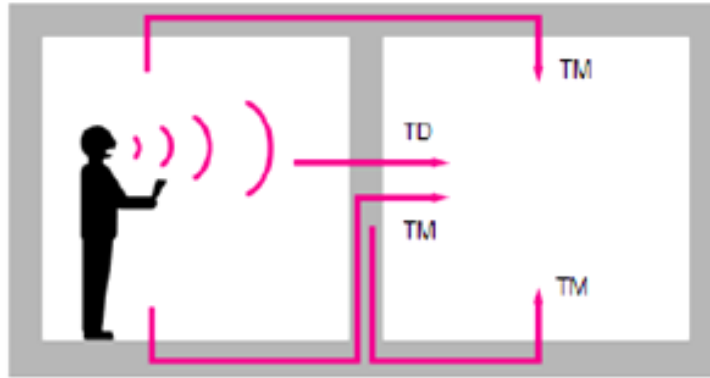


Figura 2.31 - Transmissão de ruído por via direta (TD) e marginal (TM) [Adaptado de 27]

O parâmetro que permite caraterizar o isolamento sonoro a ruídos aéreos de um elemento é o  $R$  (redução sonora, dB). Este varia com a frequência e o ângulo de incidência das ondas sonoras, sendo necessário indicar a banda de frequência, geralmente de 1/1 oitava ou 1/3 de oitava, a que o valor se refere. Se nada for referido sobre o ângulo de incidência considera-se uma incidência difusa das ondas sonoras.

$$R = 10 \log \left( \frac{1}{\tau} \right) \quad (2.21)$$

Sendo:

$\tau$  – coeficiente de transmissão.

O coeficiente de transmissão consiste na razão da energia sonora transmitida face à incidente:

$$\tau = \frac{I_{transmitida}}{I_{incidente}} \quad (2.22)$$

Quando o elemento em estudo se encontra aplicado numa dada construção, tratando-se portanto de uma medição *in situ*, a redução sonora toma uma nomenclatura distinta  $R'$  (redução sonora aparente).

O índice  $R$  apenas tem em consideração a transmissão direta do elemento, enquanto  $R'$  tem em consideração quer a transmissão direta do elemento, quer a transmissão marginal que ocorre devido à presença dos elementos envolventes. Deste modo, o valor de  $R$  é superior ao valor de  $R'$ , pois a consideração de transmissão marginal acrescenta mais percursos da onda sonora e, consequentemente diminui o isolamento sonoro e a redução sonora.

Note-se que no caso da transmissão sonora se verificar através de um elemento construtivo heterogéneo (por exemplo: no caso de uma fachada, a zona opaca e vãos envidraçados), é necessário determinar a redução sonora média ( $R_m$ ). Na prática, este valor equivale a considerar um elemento construtivo equivalente que apresente um valor de transmissão sonora que seja representativo da transmissão que efetivamente ocorre no elemento real.

A redução sonora de um elemento não homogéneo é dada pela seguinte expressão:

$$R_m = 10 \log \left( \frac{1}{\tau_m} \right) \quad (2.23)$$

O coeficiente de transmissão médio ( $\tau_m$ ) é obtido da seguinte forma:



$$\tau_m = \sum_{i=1}^n \frac{\tau_i S_i}{S_{total}} \quad (2.24)$$

Sendo:

$\tau_i$  – fator de transmissão sonora do sub-elemento construtivo  $i$ ;

$S_i$  – superfície do subelemento construtivo  $i$  ( $m^2$ ).

Admitindo a situação mais simples, a da não existência de transmissões marginais, o isolamento sonoro bruto ( $D$ ) corresponde à diferença aritmética entre os níveis de pressão sonora nos espaços, emissor e recetor (Figura 2.32):

$$D = L_1 - L_2 \quad (2.25)$$

Sendo:

$D$  – isolamento sonoro bruto a ruídos de condução aérea (dB);

$L_1$  – nível médio de pressão sonora no espaço emissor (dB);

$L_2$  – nível médio de pressão sonora no espaço recetor (dB).

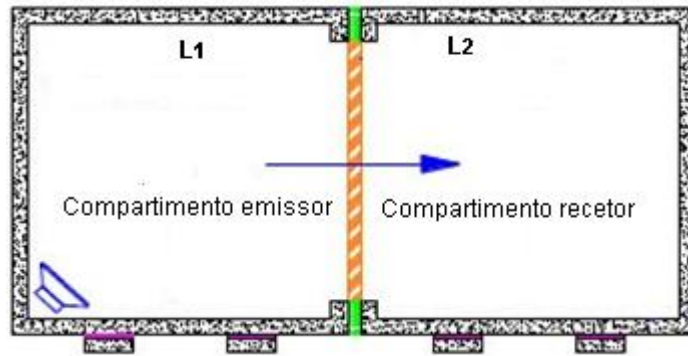


Figura 2.32 - Transmissão sonora direta entre dois compartimentos [Adaptado de 28]

O nível médio de pressão sonora no espaço recetor ( $L_2$ ) é usualmente a incógnita do problema, daí a necessidade de conhecer o isolamento do elemento de separação para avaliação do isolamento sonoro bruto, pelo que se torna assim necessário relacionar o  $D$  e  $R$ :

$$D = L_1 - L_2 = R + 10 \log \left( \frac{A}{S} \right) \quad (2.26)$$

Sendo:

$A$  – área de absorção sonora ( $m^2$ );

$S$  – superfície do elemento de separação ( $m^2$ ).

Analisando a Equação 2.26 é possível verificar que o isolamento sonoro bruto aumenta com o aumento da absorção sonora ( $A$ ) e diminui com o aumento da área de radiação sonora ( $S$ ).

A redução sonora do elemento de separação é condicionada pela existência de pequenos espaços de ar, contribuindo negativamente para o efeito do isolamento sonoro. Tal acontece, por exemplo, no caso de portas que apresentam frinchas, que degradam o seu isolamento sonoro. É necessário ter em consideração a existência destes espaços de ar nas medições da redução sonora média de elementos heterogêneos. A redução sonora do ar é nula, logo os espaços de ar existentes terão um coeficiente de transmissão de valor unitário. Para as restantes componentes o valor do coeficiente de transmissão

sonora terá um valor inferior à unidade, depende do tipo de material utilizado e consequentemente da sua redução sonora (Equação 2.27).

$$\tau = 10^{-0,1R} \quad (2.27)$$

Sendo:

$R$  – redução sonora do subelemento (dB).

Dependendo da área média dessa frincha, o isolamento sonoro global pode decair até 10 dB. Uma parede com uma redução sonora de 51 dB (na banda de oitava dos 500 Hz), com uma porta de madeira e uma redução sonora de 20 dB (na mesma banda de frequências), tem uma redução sonora média de 26,0 dB. Supondo agora a existência de uma frincha no contorno da porta com 2% da área total, a redução sonora média do conjunto desse pano de parede será de 16,5 dB. Verificando-se assim uma redução sonora devido à existência da frincha de 9,5 dB.

Na Figura 2.33 é possível observar a diminuição da redução sonora média do conjunto desse pano de parede com o aumento da percentagem da área da frincha existente no contorno da porta. Considerou-se uma percentagem limite máxima de 12 %. Para valores superiores a porta passa a estar aberta, não fazendo sentido a contabilização de frinchas existentes no seu contorno.

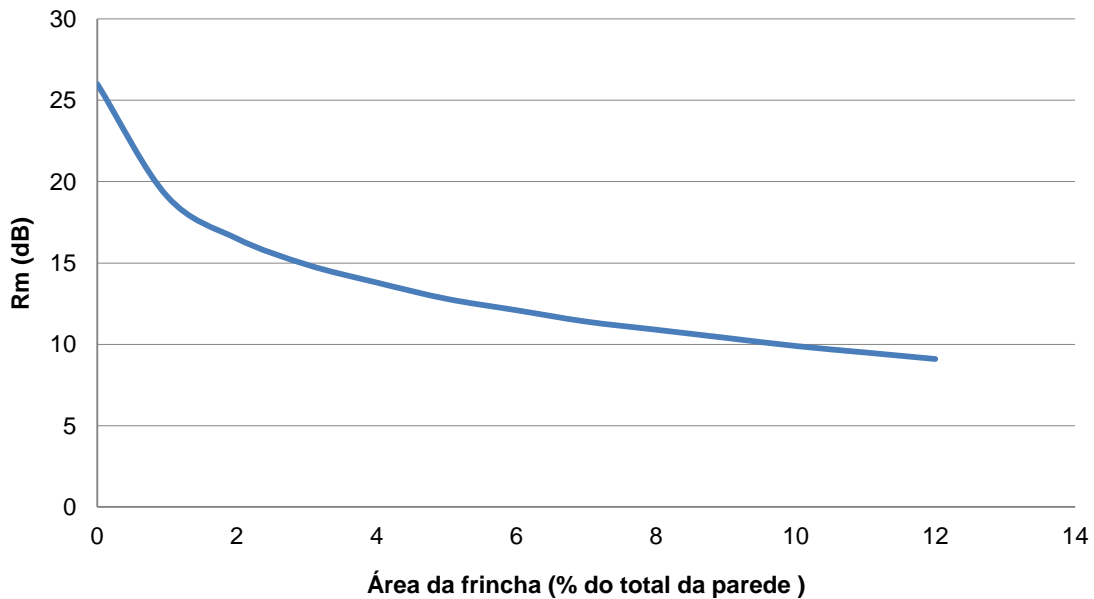


Figura 2.33 - Variação da redução sonora média do conjunto do pano de parede com a área da frincha existente no contorno da porta

O isolamento sonoro padronizado ( $D_{nT}$ ) a ruídos de condução aérea em compartimentos interiores é o valor de isolamento sonoro corrigido com o tempo de reverberação do compartimento recetor face a um valor de referência  $TR_0$ , de forma a ser possível comparar valores de isolamento sonoro garantidos por configurações construtivas distintas sem haver a necessidade de analisar as características de absorção do compartimento recetor, constatando-se que:

$$D_{nT} = D + 10 \log \left( \frac{TR}{TR_0} \right) = (L_1 - L'_2) + 10 \log \left( \frac{TR}{TR_0} \right) = R' + 10 \log \left( \frac{0,16V}{S \cdot T_0} \right) \quad (2.28)$$

Sendo:

$TR_0$  – tempo de reverberação de referência (0,5 s);

$TR$  – tempo de reverberação existente no compartimento recetor (s);

$S$  – superfície do elemento de separação ( $m^2$ ).

Note-se que a utilização do isolamento sonoro padronizado tem como vantagem a realização de ensaios em compartimentos ainda não mobilados e, por outro lado, prever a hipótese de criação de condições de absorção superiores às existentes apenas para fins de verificação regulamentar.

Quando o espaço de emissão sonora corresponde ao ambiente exterior o isolamento sonoro a ruídos aéreos é quantificado da seguinte forma:

$$D_{2m,nT} = L_{1,2m} - L_2 + 10 \log \left( \frac{TR_0}{TR_2} \right) \quad (2.29)$$

Sendo:

$L_{1,2m}$  – Nível médio de pressão sonora no exterior a 2 metros da fachada;

$L_2$  - Nível médio de pressão sonora no interior do edifício;

$TR_0$  – tempo de reverberação de referência (0,5 s).

Ambos os valores resultantes das expressões 2.28 e 2.29 são ajustados com a curva NP EN ISO 717-1 [29] (Figura 2.34), obtendo-se os valores regulamentares  $DnT,w$  e  $D_{2m,nT,w}$ , respetivamente.

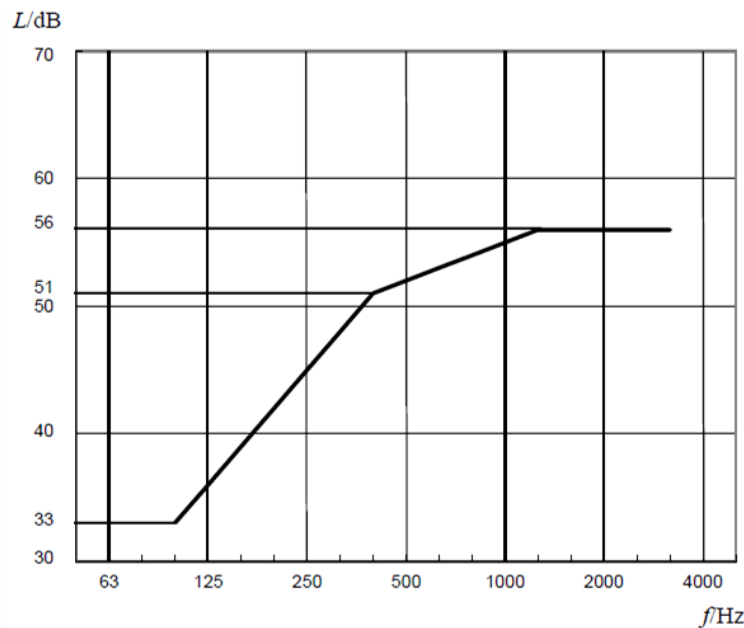


Figura 2.34 - Curva de valores de referência para ruídos de condução aérea (para o cálculo de  $DnT,w$  e  $D_{2m,nT,w}$ ) [29]

Por último, a previsão do parâmetro  $D_{2m,nT,w}$  pode ser feita a partir da determinação dos  $R_{\text{médio}_w}$  da parede exterior “homogeneizada” por todos os seus componentes. O valor  $D_{2m,nT,w}$  será então aproximadamente igual a  $R_{\text{médio}_w}$  a que se subtrai 1 (ou 2) dB para atender ao efeito de transmissões marginais e parasitas e 1 dB para ter em conta a habitual contribuição da forma da fachada (Equação 2.30).

$$D_{2m,nT,w} \cong R_{\text{médio}_w} - 2 \quad (2.30)$$

No Quadro 2.5 é possível observar os valores do isolamento sonoro a ruídos aéreos e os seus resultados subjetivos.

Em escolas um isolamento sonoro com uma classificação boa é o ideal para que o processo de aprendizagem não seja comprometido.

Quadro 2.5 - Valores indicativos do efeito do isolamento sonoro nas condições de audibilidade [1]

Isolamento sonoro (dB)	Condições de audibilidade	Classificação
< 30	A voz normal pode ser compreendida com facilidade e de modo distinto	Muito mau
30 – 35	A voz é percebida fracamente. A conversa pode ser ouvida mas não nitidamente compreendida	Mau
36 – 40	A voz pode ser ouvida mas as palavras não compreendidas com facilidade. A voz normal só será ouvida debilmente	Sofrível
41 – 45	A voz pode ser ouvida fracamente mas sem ser compreendida. A conversação normal é audível	Suficiente
46 – 50	Voz alta pode ser ouvida com pouca dificuldade	Bom
51 – 55	Só sons muito intensos (TV, canto, ect.) podem ser ouvidos	Muito Bom
56 – 60	Difícil ouvir até sons muito intensos. Apenas sons tipo “discoteca” serão audíveis	Excelente

## 3

## ACÚSTICA EM SALAS DE AULA

## 3.1. INTELIGIBILIDADE DA PALAVRA

A transmissão de palavras num dado espaço, efetuada entre o emissor e o recetor, deve ser recebida de forma completamente clara e perfeita por parte deste último, mas nem sempre isso acontece. Quando se está em ambientes ruidosos nem sempre é possível fazer-se perceber ou ouvir.

A acústica de uma sala destinada à aprendizagem é fundamental para que o se ensina seja compreendido de forma clara.

A inteligibilidade da palavra, que reflete o grau de entendimento das palavras no interior de uma sala, pode ser afetada e reduzida através de determinadas distorções. O ruído de fundo é a principal característica a provocar a diminuição da inteligibilidade da palavra seguindo-se o exagero do tempo de reverberação.

A inteligibilidade pode ser expressa em percentagem, sendo que quanto maior o seu valor, maior a compreensão do sinal acústico (Quadro 3.1).

Quadro 3.1 - Qualidade acústica e inteligibilidade da palavra [Adaptado de 30]

Qualidade acústica	Inteligibilidade da palavra
<i>Ótima</i>	$I \geq 90\%$
<i>Muito Boa</i>	$85\% \leq I < 90\%$
<i>Boa</i>	$80\% \leq I < 85\%$
<i>Satisfatória</i>	$75\% \leq I < 80\%$
<i>Regular</i>	$70\% \leq I < 75\%$
<i>Má</i>	$60\% \leq I < 70\%$
<i>Inaceitável</i>	$I < 60\%$

Quando uma pessoa emite uma mensagem oral, utiliza um tempo maior na emissão de vogais do que nas consoantes. As vogais constituem o chamado regime permanente da palavra, enquanto as consoantes encontram-se associadas ao regime transitório.

O grau de inteligibilidade da palavra está relacionado com uma boa perceção em altas frequências, pois são as consoantes que determinam a compreensão da palavra enquanto as vogais têm, em geral, um efeito quase negligenciável para tal. Em relação à intensidade (o nível de pressão sonora) a diferença entre um som mais fraco, a mais débil (consoante) e um som mais forte, a mais intensa

(vogal) é cerca de 28 dB. A duração média das consoantes é cerca de 20 ms, enquanto as vogais têm uma maior duração de cerca de 90 ms.

Em termos de direccionalidade, a voz humana emite preferencialmente para a frente do emissor, variando a direcção consoante a frequência, como se pode observar na Figura 3.1 e com uma amplitude aproximada à da Figura 3.2. O Quadro 3.2 resume a variabilidade entre vogais e consoantes.

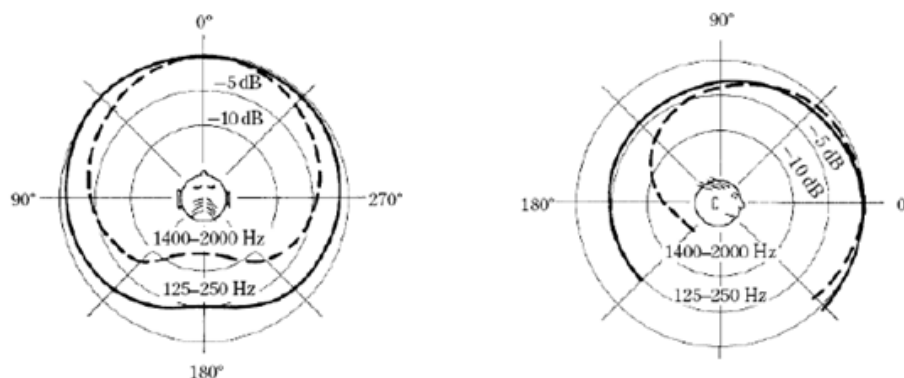


Figura 3.1 - Distribuição das ondas sonoras para altas e baixas frequências [31]

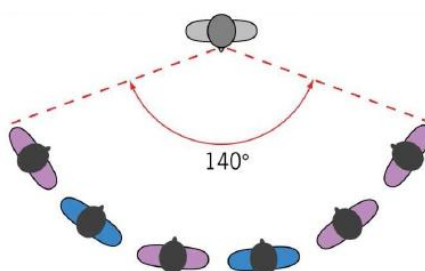


Figura 3.2 - Direccionalidade frontal da voz [32]

Quadro 3.2 - Variabilidade da emissão da voz entre vogais e consoantes [1]

Tipo	Frequência	Intensidade	Duração	Direccionalidade
Vogais	Baixas	Elevado	≈ 90 ms	-5 dB p/ -180°
Consoantes	Altas	Baixo	≈ 20 ms	-20 dB p/ -180°

### 3.2. STI E RASTI

O *Speech Transmission Index* (STI), desenvolvido com o intuito de avaliar objetivamente a inteligibilidade, expressa o grau de alteração da profundidade de modulação causada pela reverberação e pelo ruído de fundo. Os seus valores são afetados nas altas frequências pelo tempo de reverberação e nas baixas frequências pelo ruído de fundo. O STI utiliza todas as bandas de oitava dos 125 Hz aos 8 kHz, com catorze frequências de modulação. No final, obtêm-se cerca de 98 resultados. A complexidade deste método reside na quantidade de medições necessárias para cada situação.

O RASTI (*Rapid Speech Transmission Index*) é o método simplificado do STI. O RASTI é o método mais adequado para situações onde não se verifiquem distorções do som não lineares. O seu cálculo é feito para bandas de frequências de 500 Hz e 2 kHz, com quatro frequências de modulação. Após

transformados em relações S/R é feita a média dos nove valores, obtendo-se um único valor entre 0 e 1.

O RASTI deve ser substituído pelo STI sempre que se verificar pelo menos uma das seguintes situações:

- A transmissão da voz ser essencialmente linear, isto é, sem pausas na produção dos níveis sonoros;
- A transmissão da voz ser fora das bandas de frequência dos 200 Hz aos 6 kHz (isto deve-se ao facto do método ser baseado num espectro sonoro limitado);
- Ruído de fundo com tons audíveis, com picos marcantes ou depressões no espectro de banda de 1/1 oitava;
- Ruído de fundo ser impulsivo;
- O tempo de reverberação ser demasiado longo em função da frequência.

O Quadro 3.3 apresenta os valores de RASTI para diferentes classificações da qualidade acústica.

Quadro 3.3 - Variabilidade da qualidade acústica com o valor de RASTI [Adaptado de 1]

Qualidade acústica	RASTI
Muito boa	]0,75 – 1]
Boa	]0,60 - 0,75]
Razoável	]0,45 – 0,60]
Má	]0,30 – 0,45]
Inaceitável	[0 – 0,30]

### 3.3. RUÍDO DE FUNDO E CURVAS DE INCOMODIDADE

O ruído de fundo pode ser considerado como todo o ruído existente num determinado local que ajuda a mascarar os sons que o auditor pretende ouvir. Pode ser proveniente do tráfego, de obras exteriores, circulação de pessoas ou de equipamentos (aquecimento, ventilação e ar condicionado).

O ruído é um dos parâmetros que influencia a inteligibilidade da palavra, pois quanto maior for a relação sinal - ruído (S/R) maior será a inteligibilidade (Figura 3.3).

Tipicamente o valor S/R terá um valor menor quanto:

- Maior for a distância à fonte sonora;
- Menor for a distância à fonte de ruído sonoro.

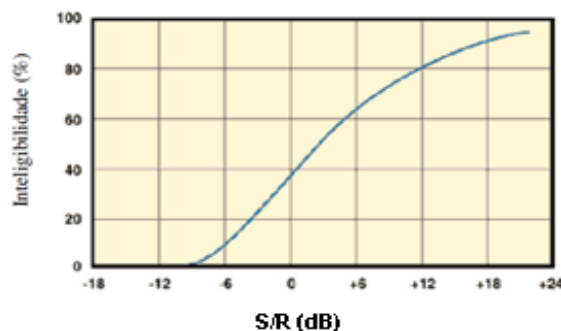


Figura 3.3 - Inteligibilidade da palavra em função da relação sinal/ruído [33]

As intensidades do ruído traduzem-se em sensações, as quais podem adquirir a denominação de incomodidade. Para avaliar a incomodidade de um local interior face ao ruído de fundo surgem critérios de conforto acústico, válidos para ruídos de fundo contínuos e estáveis (como os produzidos por equipamentos de AVAC).

Alguns critérios de conforto acústico utilizados são:

- NC (*Noise Criterion*) proposto por Leo Beranek em 1957 aplica-se a oito bandas de oitava entre os 63 Hz e os 8 kHz através do método da tangente. A classificação NC para uma dada situação significa o valor da menor curva que não é excedida por nenhum nível de pressão sonora por bandas de 1/1 oitava, isto é, que é a tangente inferiormente ao espectro dos valores de L's, na Figura 3.4 encontram-se representadas diferentes curvas de NC. Esta curva está atualmente a cair em desuso (embora lentamente).
- NR (*Noise Rating*) proposta por Kosten & Van Os em 1962, este método é semelhante ao NC, aplica-se igualmente a nove bandas de oitava com o método da tangente, a Figura 3.5 apresenta diferentes curvas de NR. É a mais usada na Europa.

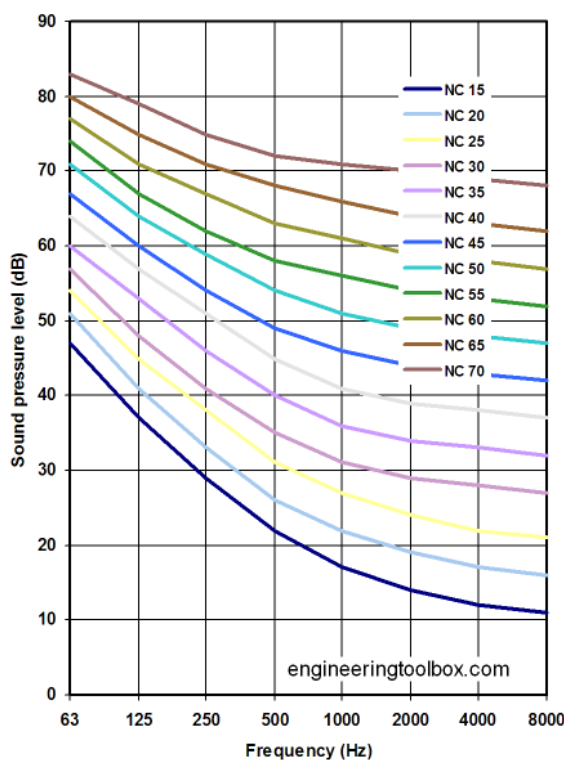


Figura 3.4 - Curvas de incomodidade NC – “*Noise Criterion*” [34]

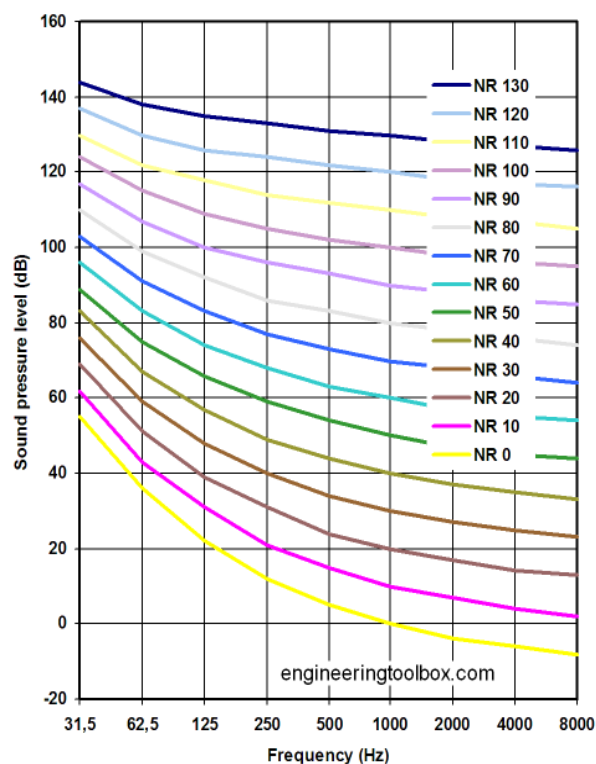


Figura 3.5 - Curvas de incomodidade NR – “*Noise Rating*” [35]

A utilização destas curvas é feita através da sobreposição da distribuição espectral dos valores dos níveis de pressão sonora obtidos no local onde está instalado o equipamento.

As curvas de incomodidade são muito úteis durante a seleção de equipamentos mecânicos a utilizar em espaços destinados à palavra. No Quadro 3.4 é apresentado o valor máximo recomendado para as curvas de NC e NR para salas de aula.



Quadro 3.4 - Valor máximo recomendado para as curvas de NC para salas de aula [Adaptado de 36]

Tipo de recinto	NC	NR
Salas de aula	30	35

### 3.4. TEMPO DE REVERBERAÇÃO

Um dos principais parâmetros que mais influencia a inteligibilidade da palavra é o tempo de reverberação ( $TR$ ). Quando uma fonte sonora emite som, composto por ondas diretas e indiretas, o ouvido humano capta esse som, que se anula ao fim de um certo período de tempo após a fonte sonora deixar de emitir esse som, por reflexões sucessivas na envolvente.

O tempo de reverberação é definido como o intervalo de tempo necessário para ocorrer um decréscimo de 60 dB do nível de pressão sonora após a fonte sonora ter interrompido a emissão (Figura 3.6). Na prática nem sempre é possível fazer decair 60 dB devido ao ruído de fundo, por isto, é usual determinar o  $TR_{30}$ , tempo que demora o nível sonoro a decair 30 dB e extrapolar para 60 dB.

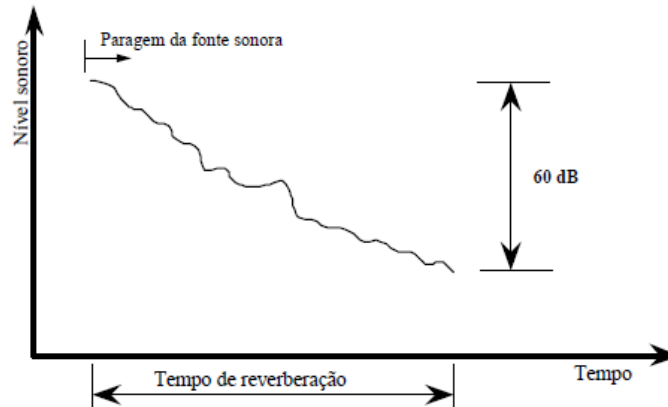


Figura 3.6 - Tempo de reverberação [37]

Wallace Clemente Sabine (1868 – 1919), físico norte-americano propôs a primeira fórmula para o cálculo do tempo de reverberação (Equação 3.1), fórmula que até aos dias de hoje é utilizada.

$$TR = \frac{0,16 \times V}{A} \quad (3.1)$$

Sendo:

$TR$  – tempo de reverberação (s);

$V$  – volume do compartimento ( $m^3$ );

$A - A = \sum_{i=1}^n \alpha_i S_i$  - absorção sonora equivalente ( $m^2$ );

$S$  – superfície real do material ( $m^2$ );

$\alpha$  – coeficiente de absorção sonora do material.

A constante 0,16 (s/m) que intervém na fórmula pode ser rigorosamente calculada através da expressão  $(24 \times \ln(10))/c$  onde  $c$  é a celeridade em m/s que depende da temperatura (Equação 2.6).

Existem outras fórmulas usadas para calcular o tempo de reverberação (Eyring, Millington-Sette, Kuttruff, etc.) mas todas elas tiveram por base a fórmula de Sabine.

A Figura 3.7A representa graficamente o TR para 60 dB de decaimento. O ruído de fundo é de 30 dB (ou até mesmo 20 dB) e o nível da fonte sonora é de 100 dB. Na Figura 3.7B o nível de pressão sonora contínua é cerca de 60 dB e para ocorrer um decréscimo de 60 dB seria necessário que a fonte sonora emitisse 120 dB, o que não é exequível. Por este motivo é que o tempo de reverberação é calculado para um decaimento de 30 dB (ou 20 dB) e extrapolado para os 60 dB, como se pode observar na reta a tracejado da Figura 3.7B.

O efeito mais importante de um tempo de reverberação excessivo é a diminuição da inteligibilidade da palavra. Isto deve-se ao facto do baixo nível sonoro da emissão das consoantes e a sua curta duração serem ofuscados pelo “rasto sonoro” de vogais imediatamente antecedentes. Tal é ilustrado na Figura 3.8, onde se analisa a palavra *back* em duas situações do tempo de reverberação (0,5 e 1,5 s). Com um curto tempo de reverberação quer o “ba” quer o “ck” são inteligíveis e a palavra *back* é compreensível. Para um tempo de reverberação elevado (linha a tracejado), o som “ck” fica totalmente ofuscado pelo rasto sonoro “ba”, tornando-se não inteligível e não distinguível de outras palavras com início semelhante [1].

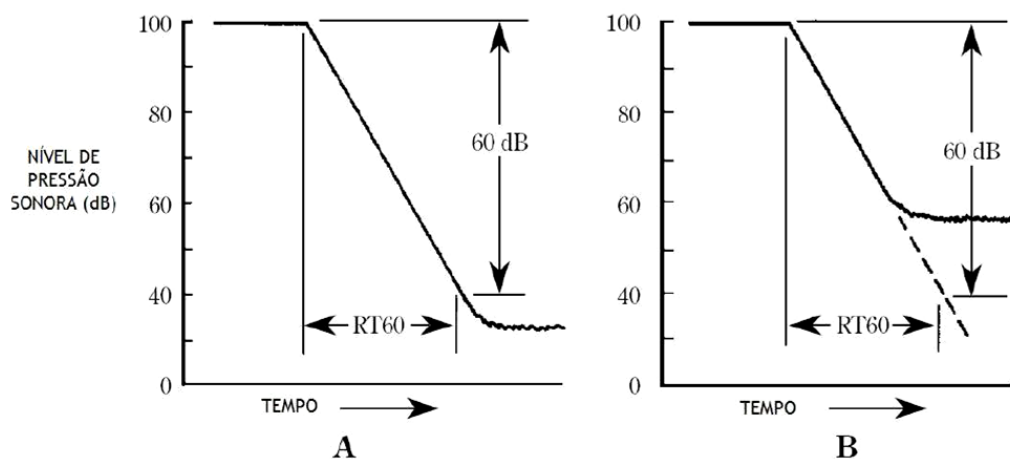


Figura 3.7 - Representação gráfica do tempo de reverberação [Adaptado de 1]

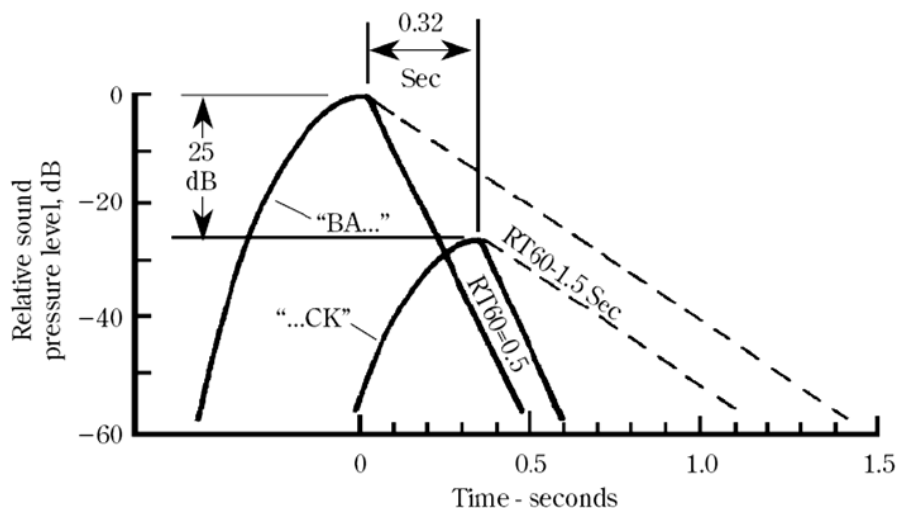


Figura 3.8 - Efeito na inteligibilidade da palavra *back* em dois cenários de tempo de reverberação (0,5 e 1,5 s) [1]

### 3.5. LEGISLAÇÃO

#### 3.5.1. PORTUGAL

Em Portugal, o primeiro Regulamento Geral sobre o Ruído (Decreto-Lei nº 251/87), designado por RGR entrou em vigor em 1988 [38]. Este documento continha disposições relativas às várias áreas em que a componente ruído continha matéria relevante, nomeadamente as que se relacionavam com zonamentos acústicos para efeitos de integração urbanística, com as condições relativas à observação de limites de exposição ao ruído em locais de trabalho e com exigências visando o estabelecimento de requisitos de isolamento sonoro e de conforto acústico adequado nos edifícios.

Este documento sofreu alterações ao longo do tempo e foi substancialmente revogado com a publicação do Regime Legal sobre a Poluição Sonora – RLPS – (Decreto-Lei nº 292/2000), que entrou em vigor a 11 de Maio de 2001 [38].

O Regulamento Geral do Ruído (RGR), ao revogar o supra referido regulamento de 2000, consagrou um novo princípio de abordagem no capítulo do ruído, na medida em que efetivou a separação entre o ruído ambiente e o condicionamento dos edifícios [38].

Entre outros documentos que entretanto foram surgindo, a 11 de Maio de 2002 foi publicado o Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios (RRAE), tendo-se, assim, a partir desta data, um corpo legislativo independente [38].

Para o caso em estudo apenas se torna necessário a análise do artigo 7º do RRAE de 2008, que especifica os seguintes requisitos acústicos para edifícios escolares e similares, e de investigação [38]:

1. *O índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea,  $D_{2m,nT,w}$ , entre o exterior dos edifícios e os compartimentos interiores identificados no Quadro 3.5, deve satisfazer o seguinte:*
  - i.  $D_{2m,nT,w} \geq 33$  dB, em zonas mistas ou em zonas sensíveis onde está prevista a construção de uma grande infraestrutura de transporte;
  - ii.  $D_{2m,nT,w} \geq 28$  dB, em zonas sensíveis;
  - iii. Quando a área translúcida for superior a 60% do elemento de fachada em análise, deve ser adicionado ao índice  $D_{2m,nT,w}$  o termo de adaptação apropriado,  $C$  ou  $C_{tr}$  conforme o tipo de ruído dominante na emissão, mantendo-se os limites das sublíneas i) e ii).
2. *O índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea,  $D_{nT,w}$ , entre locais do edifício, deve satisfazer as condições indicadas no Quadro 3.6;*
3. *No interior dos locais que constem no Quadro 3.7, considerados mobilados normalmente e sem ocupação, o tempo de reverberação,  $TR$ , correspondente à média aritmética dos valores obtidos para as bandas de oitava centradas nas frequências de 500 Hz, 1000 Hz e 2000 Hz, deve satisfazer as condições indicadas no referido quadro;*
4. *O paramento interior da envolvente dos átrios e corredores de grande circulação deve ser dotado de revestimentos absorventes sonoros, cuja área de absorção sonora equivalente,  $A$  ( $m^2$ ), correspondente à média aritmética dos valores obtidos para as bandas de oitava centradas nas frequências de 500 Hz, 1000 Hz e 2000 Hz, seja maior ou igual a 25% da superfície de pavimento dos locais considerados;*

Quadro 3.5 - Valores limite mínimos de  $D_{nT, w}$ , entre locais do edifício, segundo o RRAE [38]

Locais de emissão \ Locais de receção	Salas de aula (*), de professores, administrativas	Bibliotecas e gabinetes médicos	Salas polivalentes e berçários
Salas de aula, de professores, administrativa	$\geq 45$	$\geq 45$	$\geq 45$
Salas de aula musical, salas polivalentes, refeitórios, ginásios e oficinas	$\geq 55$	$\geq 58$	$\geq 50$
Berçários	$\geq 53$	$\geq 55$	$\geq 48$
Corredores de grande circulação (**)	$\geq 30$	$\geq 35$	$\geq 30$

(\*) Incluindo salas de aula musical;

(\*\*) Considerando que haverá porta de comunicação com os locais recetores, se tal não for o caso, os valores indicados serão acrescidos de 15 dB.

Quadro 3.6 - Limites para o tempo de reverberação segundo RRAE [38]

Locais	Tempo de reverberação (500, 1k, 2k Hz) [s]
Salas de aula, bibliotecas, salas polivalentes e refeitórios	$TR \leq 0,15V^{1/3}$

V – Volume do espaço em causa ( $m^3$ ).

5. No interior dos locais de receção indicados no Quadro 3.5, o nível de avaliação,  $L_{Ar, nT}$ , do ruído particular de equipamentos do edifício deve satisfazer as condições indicadas no Quadro 3.7.

Quadro 3.7 - Nível de  $L_{Ar, nT}$  limite, segundo o RRAE [38]

Locais	Nível de avaliação, $L_{Ar, nT}$ (dB) $\leq$
Biblioteca	35, se em funcionamento intermitente
	30, se em funcionamento contínuo
Restantes locais de receção indicados no Quadro 3.5	40, se em funcionamento intermitente
	35, se em funcionamento contínuo

O edifício, ou qualquer das suas partes, é considerado de acordo com os requisitos acústicos aplicáveis quando, simultaneamente:

- O valor obtido de  $D_{2m, nT, w}$  ou  $D_{nT, w}$  acrescido de 3 dB, satisfaça o limite regulamentar;
- O valor obtido de  $L_{Ar, nT}$  diminuído de 3 dB, satisfaça o limite regulamentar;
- O valor obtido de TR diminuído de 25% do limite regulamentar, satisfaça o limite regulamentar.

## 3.5.2. OUTROS PAÍSES

Neste subcapítulo são evidenciados requisitos acústicos alusivos ao tempo de reverberação e ao índice de isolamento sonoro a ruídos de condução aérea, referentes ao Reino Unido, França e Nova Zelândia.

No Reino Unido os requisitos referentes ao ruído em edifícios escolares entraram em vigor em 2003, com a designação de *Building Bulletin* 93 (BB 93) [39], que veio substituir o *Building Bulletin* 87 (BB 87) [40]. O BB 93 é um documento de carácter obrigatório quando comparado com o documento anterior. No Quadro 3.8 são apresentados os valores mínimos de  $D_{nT, w}$  consoante a atividade ruidosa na sala e a tolerância de ruído para espaços adjacentes e no Quadro 3.9 são apresentados os valores máximos do tempo de reverberação. Além destes valores são também apresentados os valores máximos do *Speech Transmission Index* (STI) em edifícios escolares (Quadro 3.10).

Quadro 3.8 - Valores mínimos de  $D_{nT, w}$  em edifícios escolares, segundo os requisitos ingleses BB 93 [39]

$D_{nT, w}$ (dB)		Ruído na sala emissora			
		Baixa	Média	Alta	Muito alta
Tolerância de ruído para espaços adjacentes	Alto	30	35	45	55
	Médio	35	40	50	55
	Baixo	40	45	55	55
	Muito baixo	45	50	55	60

Quadro 3.9 - Valores máximos do tempo de reverberação, segundo os requisitos ingleses BB 93 [Adaptado 39]

Locais	Tempo de reverberação (500, 1k, 2k Hz) [s]
Salas de aula – escolas primárias (*)	0,6
Salas de aula – escolas secundárias (*)	0,8
Salas de aula <i>open-plan</i> (*)	0,8
Salas de música (*)	1,0
Salas de leitura pequenas (menos de 50 pessoas) (*)	0,8
Salas de leitura grandes (mais de 50 pessoas) (*)	1,0
Salas de aula para alunos com problemas auditivos (*)	0,4
Salas de estudo (*)	0,8
Bibliotecas (*)	1,0
Salas multiusos (**)	0,8 – 1,2
Corredores, átrios (*)	1,5
Salas administrativas, salas de professores (*)	1,0

(\*)  $TR_{[125, 250 \text{ Hz}]} = 1,30 \times TR_{[500, 1k, 2k \text{ Hz}]}$ ; (\*\*)  $TR_{[125, 250 \text{ Hz}]} = 1,50 \times TR_{[500, 1k, 2k \text{ Hz}]}$ .

Quadro 3.10 - Valor mínimo do *Speech Transmission Index* (STI) em edifícios escolares segundo os requisitos ingleses BB 93 [Adaptado de 39]

Tipo de sala	STI
Salas de aula <i>open-plan</i>	0,6

Em França, no decreto de 25 de Abril de 2003 [41], são estabelecidos limites de ruído e requisitos técnicos para instituições de ensino. No Quadro 3.11 são apresentados os valores mínimos recomendados para o isolamento sonoro a ruídos de condução aérea. Relativamente ao tempo de reverberação é possível observar no Quadro 3.12 os limites estabelecidos para diferentes locais.

Quadro 3.11 - Valores mínimos de  $D_{nT,W}$  recomendados segundo os requisitos franceses [Adaptado de 41]

Locais de emissão Locais de receção	Salas de aula, Sala de administração	Local de circulação	Sala de música, sala polivalente, sala de desporto
Sala de aula, sala de atividade prática, sala de administração, biblioteca, sala de música, sala de reunião, sala de professor, Oficinas	43(*)	30	53
Sala polivalente	40	30	50

(\*) Um isolamento de 40 dB é admitido na presença de uma ou mais portas de comunicação.

Quadro 3.12 - Limites para o tempo de reverberação, segundo a legislação francesa [41]

Locais	Tempo de reverberação (500, 1k, 2k Hz) [s]
Locais de ensino, de música, de estudos, restaurantes/cantinas e infantários Volume > 250 m <sup>3</sup>	0,4 ≤ TR ≤ 0,8
Salas de aula, creches, salas de aprendizagem Volume ≤ 250 m <sup>3</sup>	0,6 ≤ TR ≤ 1,2
Salas multiusos Volume > 250 m <sup>3</sup> (*)	0,6 ≤ TR ≤ 1,2 (**)
Outros locais acessíveis aos alunos com Volume > 250 m <sup>3</sup>	TR ≤ 1,2 se 250 m <sup>3</sup> < V < 512 m <sup>3</sup> TR ≤ 0,15 <sup>3</sup> √V se V > 512 m <sup>3</sup>

(\*) Caso o restaurante/cantina seja usada como multiusos, os valores a utilizar são os da sala de refeições;

(\*\*) É obrigatório um estudo particular para que a sala apresente uma boa inteligibilidade da palavra.

Na Nova Zelândia destaca-se a norma AS/NZS 2107 [42], onde são indicados os valores limites do ruído de fundo e do tempo de reverberação para um conjunto de edifícios, incluindo escolas (Quadro 3.13). No Quadro 3.14 são apresentados os valores mínimos recomendados para o índice de redução sonora.

Quadro 3.13 - Valores máximos do tempo de reverberação e ruído de fundo segundo a AS/NZS 2107 [Adaptado de 42]

Locais	Ruído de fundo (dB)	Tempo de reverberação (500, 1k, 2k Hz) [s]
Salas de desenho	40	0,5 – 0,7
Salas de aula – escola primária	35	0,4
Salas de aula – escola secundária	35	0,5
Salas de aula para alunos com problemas auditivos	30	0,4
Salas de informática	40	0,5
Laboratórios	35 - 40	0,5 – 0,6
Bibliotecas	35 - 40	0,5 – 0,8
Salas de música	35	0,3 – 1,4 (*)
Salas de aula <i>open-plan</i>	40	0,4
Oficinas	40	(**)

(\*) Depende do fim a que se destina a sala, do volume e do pé-direito;

(\*\*) O menor possível mas não deve exceder os 0,8 s.

Quadro 3.14 - Valores mínimos de  $R_w$  recomendados segundo AS/NZS 2107 [Adaptado de 42]

Locais de emissão Locais de recepção	Biblioteca, sala de estudo	Sala de aula	Sala polivalente	Oficinas (ruído moderado)	Oficinas (ruído elevado)	Ginásio	Salas de música
Oficina	60	60	60	55	55	55	60
Ginásio	60	60	60	55	55	55	60
Salas de aula	50	50	60	50	60 (*)	60 (*)	60
Salas polivalentes	60	60	60	55	60 (*)	60	60
Biblioteca, sala de estudo	45	50	60	50	60 (*)	60	60
Sala de música	60	60	60	60	60 (*)	60 (*)	60

(\*) Estas salas não deverão ficar diretamente adjacente.

Comparando os quatro países analisados verifica-se uma concordância entre os valores mínimos do  $D_{nT,w}$  entre salas de aula estabelecidos em Portugal e Reino Unido. Por outro lado, verifica-se os limites estabelecidos na legislação neozelandesa são superiores aos restantes países, uma vez que se trata de valores obtidos em laboratório não sendo contabilizadas as transmissões marginais, por outro lado, é de salientar que os limites estabelecidos na legislação francesa são inferiores aos restantes países analisados.

Quanto aos valores mínimos do  $D_{nT,w}$  estabelecidos entre salas de aula e corredores verifica-se uma concordância dos limites mínimos estabelecidos em Portugal e França e, por outro lado, verifica-se que o Reino Unido apresenta um valor limite mínimo superior a estes países.

Relativamente ao tempo de reverberação, no Reino Unido e na Nova Zelândia o valor máximo para as situações indicadas é independente do volume da sala. Pelo contrário, em Portugal e na França o valor máximo regulamentar é infelizmente, função do volume da sala, existindo assim algumas diferenças entre estes valores.

Quadro 3.15 - Comparação entre Portugal, Reino Unido, França e Nova Zelândia perante quatro situações [38,39,41,42]

	Tipo de sala		Portugal	Reino Unido	França	Nova Zelândia
Valores mínimos	Isolamento sonoro a ruídos de condução aérea entre salas de aula (dB)		45 <sup>a)</sup>	45 <sup>a)</sup>	43 <sup>a)</sup>	50 <sup>b)</sup> (48 <sup>c)</sup> )
	Isolamento sonoro a ruídos de condução aérea entre salas de aula e corredores (dB)		30 <sup>a)</sup>	45 <sup>a)</sup>	30 <sup>a)</sup>	-
Valores máximos	TR nas salas de aula (s)	Bandas de frequência	0,9 <sup>d)</sup>	0,8	1,2	0,5
		500, 1k, 2k Hz				
	TR nas bibliotecas (s)	Bandas de frequência	1,2 <sup>e)</sup>	1,0	0,8	0,8
		500, 1k, 2k Hz				

a)  $D_{nT,w}$ ; b)  $R_w$ ; c) Previsível  $D_{nT,w}$  ( $D_{nT,w} \approx R_w - 2$ ); d)  $V=250 \text{ m}^3$ ; e)  $V=550 \text{ m}^3$ .



# 4

## TIPOS DE ISOLAMENTO PARA PORTAS

### 4.1. FRINCHAS LATERAIS E SUPERIORES

Existem diferentes materiais possíveis de utilizar para isolar frinchas laterais e superiores existentes em portas. Estes materiais são muito variáveis em termos de espessura, largura, comprimento, marcas, constituição e custos. Em termos do modo de aplicação usam-se habitualmente os adesivos e são aplicados na parte fixa do caixilho formando um vedante (Figura 4.1).



Figura 4.1 - Modo de aplicação do material isolante nas frinchas existentes no aro da porta [43]

No Quadro 4.1 apresentam-se alguns materiais que podem ser aplicados em frinchas laterais e superiores existentes em portas.

Quadro 4.1 - Listagem de alguns materiais que podem ser aplicados em frinchas laterais e superiores existentes em portas

Tipo de material	Marca/ Modelo	Largura (mm)	Espessura máxima da frincha (mm)	Comprimento (m)	Modo de aplicação	Custo/ m linear (€)
PVC	PP	12	12	1	Adesivo	2,19
	PP	18	18	1		2,59
	PP	-	9	10		0,19
	GPI	12	-	2		1,45
	Tesa MOLL	9	5	25		1,21
Borracha	AXTON	-	3	5,5	Adesivo	0,82
	AXTON	-	4	5,5		0,63
	AXTON	-	4,5	6		0,75
	AXTON	-	5	5,5		1,00
	AXTON	-	7	6		0,92
	Tesa MOLL	20	-	5		2,00
	Tesa MOLL	9	3,5	25		1,03
	Tesa MOLL	9	5	25		1,12
	Tesa MOLL	20	5	5		2,00
	Tesa MOLL	9	7	6		3,00
Silicone	BRESME	-	7	6	Adesivo	1,83
	Ceys	7	7	6		1,92
	Tesa MOLL	9	3,5	25		1,03
Polipropileno	Tesa MOLL (Perfil V)	-	4	5	Adesivo	1,40

#### 4.2. FRINCHAS INFERIORES

Para isolar frinchas inferiores presentes em portas existe uma grande variedade de materiais que se podem utilizar. Tal como os materiais mencionados no subcapítulo 4.1, estes também são muito variáveis em termos de espessura, largura, comprimento, marcas, tipo de material, constituição e custos.

Relativamente ao tipo de material, este pode ser de:

- Borracha, Rolo de tecido e PVC – são os mais simples e consistem numa tira que raspa no chão formando um vedante. A versão mais simples consiste numa barra adesiva (Figura 4.2); um outro sistema consiste num perfil de metal ou plástico que é aparafusado (Figura 4.3). Estes perfis são colocados no interior e são apropriados para pavimentos lisos e macios;
- Escova – consiste numa longa escova de *nylon* fixa num perfil de metal ou plástico (Figura 4.4). É apropriado para pavimentos desnivelados ou com texturas.

No Quadro 4.2 apresentam-se alguns materiais que podem ser aplicados em frinchas inferiores existentes em portas.

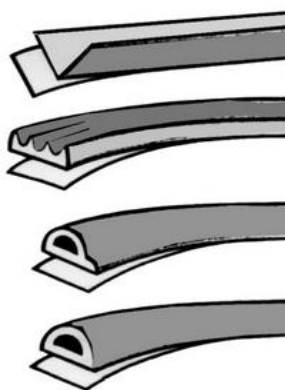


Figura 4.2 - Material adesivo utilizado para a colmatação de frinchas [43]

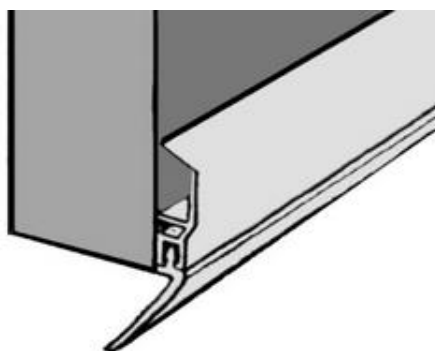


Figura 4.3 - Material em perfil de metal aparafusado à porta [43]

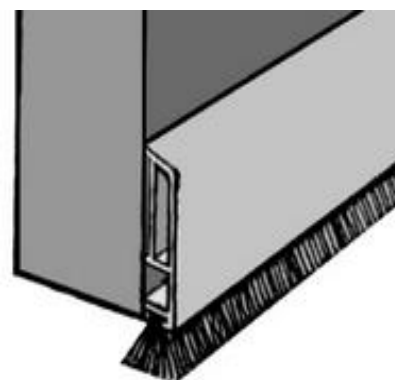


Figura 4.4 - Escova de *nylon* fixa num perfil de metal aparafusado à porta [43]

Quadro 4.2 - Listagem de alguns materiais que se podem aplicar em frinchas inferiores existentes em portas

Tipo de material	Marca/ Modelo	Largura (mm)	Espessura máxima da frincha (mm)	Comprimento (m)	Modo de aplicação	Custo/ m linear (€)
PVC	<i>BRESME</i>	-	-	1	Adesivo	2,99
	<i>AXTON</i>	-	12	9,3		0,45
	<i>Tesa MOLL</i> (Rolo duplo)	25	22	9,5	Encaixe	1,37
	<i>ADEO</i> (Rolo duplo)	-	22	1		5,19
	<i>Tesa MOLL</i>	38	20	1	Adesivo	3,29
	<i>Tesa MOLL</i> (Rolo duplo)	95	25	1		12,50
	<i>GPI</i>	30	8	9,3	Adesivo	0,48
Borracha	<i>BRESME</i>	-	-	1		5,29
	<i>GPI</i> (Duplo)	-	12	9,3	Encaixe	0,73
	<i>GPI</i> (Duplo)	-	20	9,3		1,11
	<i>Tesa MOLL</i>	38	20	1	Adesivo	4,20
	<i>Tesa MOLL</i>	-	15	1		12,95
	<i>BRESME</i>	-	-	2,5	Aparafusar	2,20
	<i>AXTON</i>	-	14	9,3		0,54
Escova	<i>BRESME</i>	-	-	1	Adesivo	5,29
	<i>Tesa MOLL</i>	37	12	1		10,99
	<i>Tesa MOLL</i>	43	15	1		12,99
	<i>Tesa MOLL</i>	40	15	1	Encaixe	18,99
	<i>GPI</i>	-	13	9,3		1,67
Rolo de tecido	<i>Tesa MOLL</i>	-	-	1,2	Encaixe	6,08



# 5

## ENSAIOS

### 5.1. CARATERIZAÇÃO DA AMOSTRA

A Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto foi inaugurada no dia 22 de Março de 2001. Nessa altura a faculdade era constituída por diferentes edifícios, identificados com as letras de A a N (Figura 5.1).

O edifício B é o edifício principal e destinado às salas de aula. A sala de aula utilizada como caso de estudo neste trabalho é a sala B024, onde a letra representa o bloco a que a sala pertence, o primeiro algarismo representa o piso e os dois últimos algarismos representam o número da sala. Logo a sala de aula em estudo é a vigésima quarta localizada no piso 0 e pertence ao bloco B.

As caraterísticas e a imagem da sala são apresentadas no Quadro 5.1.

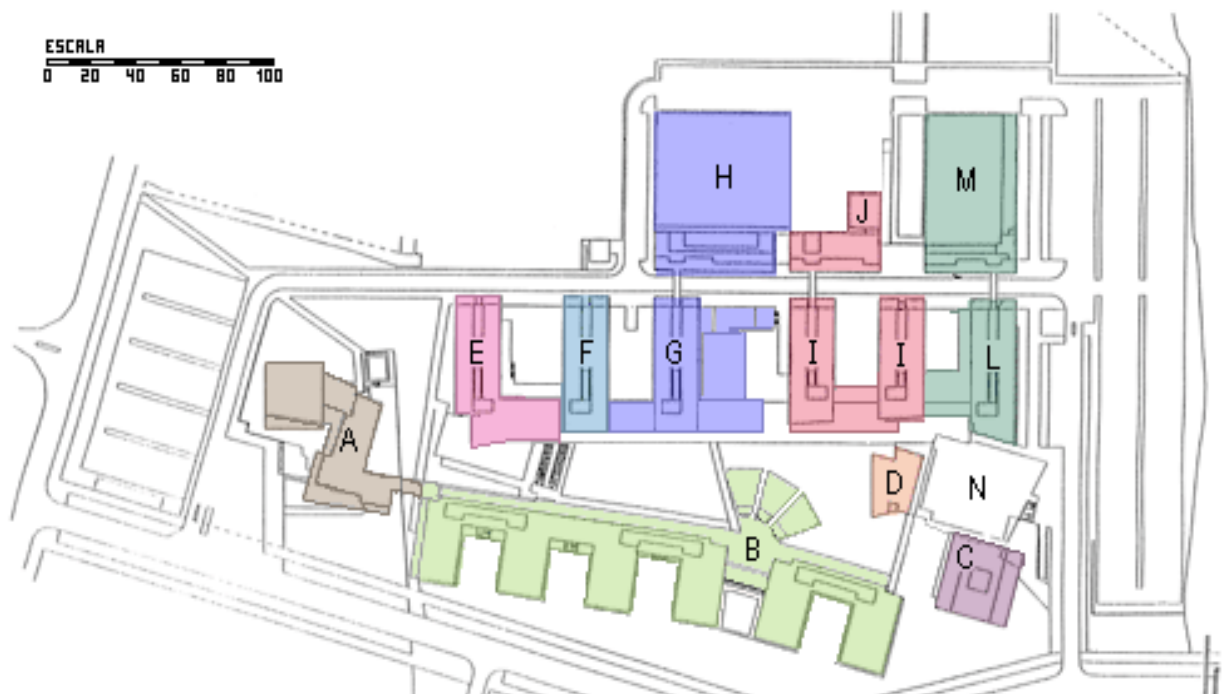


Figura 5.1 - Planta da FEUP na data da sua inauguração [44]

Quadro 5.1 - Descrição da sala utilizada como caso de estudo da FEUP

Sala	Comprimento (m)	Largura (m)	Altura média (m)	Área (m <sup>2</sup> )	Volume (m <sup>3</sup> )	Lotação (unidades)
B024	8,96	6,40	2,93	57	167	60



## 5.2. RUÍDO DE FUNDO

Para avaliar o ruído de fundo foi escolhido, tanto no interior como no exterior da sala um ponto estratégico de modo a caracterizar a totalidade da situação. Os pontos escolhidos corresponderam ao seu centro geométrico e a 2,5 metros da porta P1, no interior e exterior da sala respetivamente (Figura 5.2).

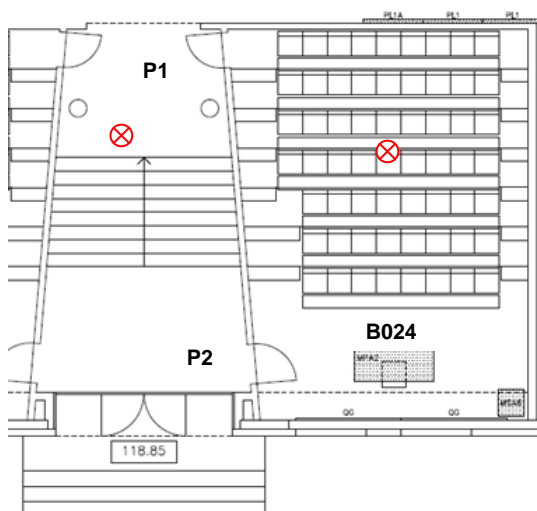


Figura 5.2 - Posições escolhidas para medição do ruído de fundo no interior e exterior da sala B024

O ensaio foi realizado com o auxílio do sonómetro Brüel & Kjær 2260 (Figura 5.3), havendo o cuidado de registar apenas os valores dos níveis de pressão sonora do ruído de fundo, sem picos causados por eventuais ruídos originados no exterior da sala.

Durante a realização do ensaio apenas se encontrava no interior da sala o Eng. António Costa do Laboratório de Acústica da FEUP e a autora deste trabalho.



Figura 5.3 - Sonómetro Brüel & Kjær 2260 colocado no interior da sala B024 [Fotografia da autora]

### 5.3. TEMPO DE REVERBERAÇÃO

Para avaliar o tempo de reverberação foram escolhidos alguns pontos estratégicos de forma a caracterizar completamente a sala em estudo. Os pontos escolhidos situaram-se a  $1/2$  e a  $1/4$  do seu eixo longitudinal, sendo avaliadas apenas algumas filas de lugares, nomeadamente a primeira, a terceira e a quinta (Figura 5.4).

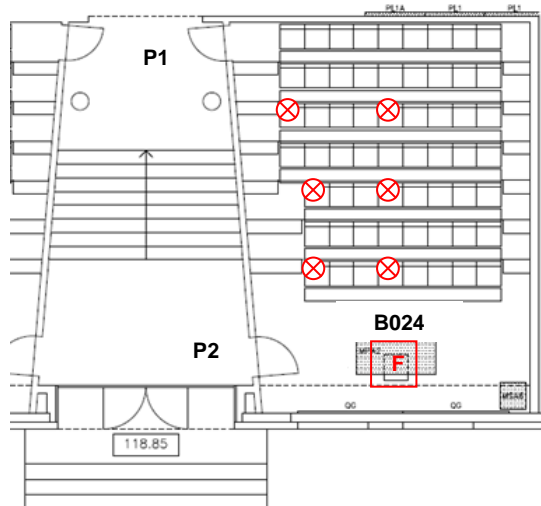


Figura 5.4 - Posições escolhidas para a medição do tempo de reverberação no interior da sala B024, sendo F a posição do emissor e os círculos as diferentes posições do sonómetro

No ensaio utilizou-se uma fonte sonora para emissão de um ruído rosa, que cobre o espectro de frequências importantes, assegurando sempre um ruído superior ao ruído de fundo. Foram registados os decaimentos do TR de 20 dB e de 30 dB, porém os valores registados pelo sonómetro são os valores extrapolados para o decaimento de 60 dB. Estes valores resultam de uma média ponderada de duas medições feitas em cada ponto, obtidas rodando o sonómetro de  $45^\circ$  entre a primeira e a segunda medição.

Os equipamentos usados no ensaio foram o sonómetro Brüel & Kjær 2260 (Figura 5.3) e a fonte sonora Brüel & Kjær 4224 (Figura 5.5).

Durante a realização do ensaio apenas se encontrava no interior da sala o Eng. António Costa do Laboratório de Acústica da FEUP e a autora deste trabalho.



Figura 5.5 - Fonte sonora Brüel & Kjær 4224 [Fotografia da autora]

#### **5.4. RAPID SPEECH TRANSMISSION INDEX – RASTI**

Para avaliar o RASTI foram utilizados os pontos estratégicos referidos no subcapítulo 5.3, designadamente a 1/2 e a 1/4 do eixo longitudinal da sala, sendo avaliadas apenas algumas filas de lugares, a primeira, a terceira e a quinta (Figura 5.4). O ensaio foi realizado com o auxílio do equipamento de Brüel & Kjær 3361, composto por um emissor, Brüel & Kjær 4225 (Figura 5.6) e um recetor, Brüel & Kjær 4419 (Figura 5.7).



Figura 5.6 - Transmissor RASTI Brüel & Kjær 4225  
[Fotografia da autora]



Figura 5.7 - Recetor RASTI Brüel & Kjær 4419  
[Fotografia da autora]

O emissor foi colocado no eixo longitudinal da sala, na posição mais comum do orador, a 1,25 metros de distância da parede. Este emitia um sinal sonoro caraterístico nas frequências de 500 e 2000 Hz. No ensaio foi usado um nível de referência +10 dB de modo ao ruído existente nos corredores não interferir nos resultados.

O recetor foi colocado em seis pontos distintos da sala, sendo adotada uma medição com duração de 8 s. Para os pontos localizados a 1/4 do eixo longitudinal da sala foram realizadas três medições e para os pontos localizados a 1/2 foram realizadas duas medições. Obtendo-se um total de cinco medições para as três filas analisadas.



Durante a realização do ensaio apenas se encontrava no interior da sala o Eng. António Costa do Laboratório de Acústica da FEUP e a autora deste trabalho.

### 5.5. ÍNDICE DE ISOLAMENTO SONORO A RUÍDOS DE CONDUÇÃO AÉREA PADRONIZADO

Para avaliar o índice de isolamento sonoro a ruídos de condução aérea foram escolhidas quatro posições, duas delas no interior de modo a caracterizar os locais da sala mais desfavorecidos face ao ruído proveniente do exterior (os mais próximos das portas) e duas no exterior da sala. Em cada posição foram escolhidos cinco pontos localizados a uma distância aproximada de 2,10 metros da parede, na direção das portas, e em cada ponto foram realizadas duas medições, obtendo-se assim um total de 10 medições para cada uma das quatro posições escolhidas (Figura 5.8).

Para a realização do ensaio foi utilizada uma fonte sonora, a mesma utilizada dos ensaios anteriores (Figura 5.5), que foi colocada na parte exterior da sala (Figura 5.8).

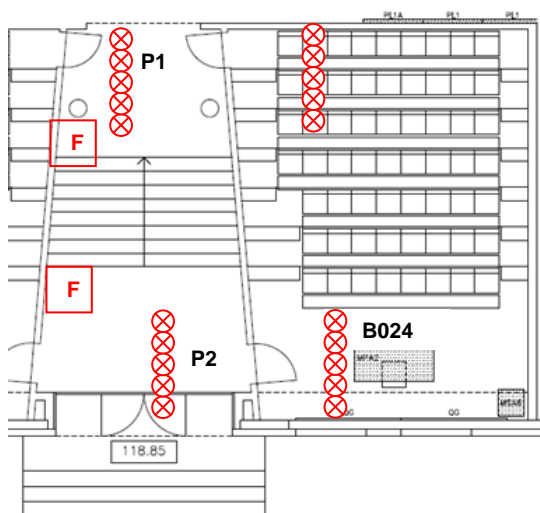


Figura 5.8 - Posições escolhidas para a colocação da fonte sonora Brüel & Kjær 4224 (F) e medição dos níveis de pressão sonora, no interior e exterior da sala B024 (círculos)

Inicialmente procedeu-se às medições na parte superior da sala. Colocou-se a fonte sonora na zona superior das escadas, e registaram-se os valores dos níveis de pressão sonora no exterior e no interior da sala. Após terminadas estas medições, mudou-se a fonte sonora para a zona inferior das escadas, procedendo-se de seguida às medições dos níveis de pressão sonora no exterior e no interior da sala. Para cada posição obteve-se, uma média das 10 medições dos níveis de pressão sonora registados em banda de 1/3 de oitava.

Com a diferença dos valores dos níveis de pressão sonora registados no emissor e no recetor obtém-se o isolamento sonoro bruto ( $D$ ), que necessita de ser corrigido para o tempo de reverberação do compartimento recetor padronizado  $TR_0$  (0,5 s). Depois de realizada a correção obtém-se o isolamento sonoro a ruídos aéreos padronizado ( $DnT$ ), que aplicando a curva de referência NP-717-1 (Figura 2.34) será transformado no índice regulamentar  $DnT,w$ .

Durante a realização do ensaio apenas se encontrava no interior da sala o Eng. António Costa do Laboratório de Acústica da FEUP e a autora deste trabalho.



## 6

## APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

## 6.1. SITUAÇÃO INICIAL – SEM TRATAMENTO DAS FRINCHAS

## 6.1.1. RUÍDO DE FUNDO

Com o objetivo de determinar o isolamento sonoro bruto (D) entre o exterior e o interior da sala B024, comparou-se os valores médios do ruído de fundo ( $L_{eq}$ ), medidos no exterior e interior da sala, quantificando assim a redução sonora bruta provocada pela parede da sala. Estes valores foram medidos na primeira fase de medições que se realizou no dia 02/04/2014 pelas 10 horas. O Quadro 6.1 apresenta os valores dos respetivos níveis de pressão sonora do ruído de fundo. Para uma melhor compreensão dos resultados pode-se observar na Figura 6.1 os níveis de pressão sonora ( $L_{eq}$ ) para o interior e exterior da sala.

O ruído de fundo irá afetar todos os utilizadores da sala, sendo necessário ter em conta não só os níveis de pressão sonora equivalente ( $L_{eq}$ ) como também os valores dos níveis de pressão sonora corrigidos para o ouvido humano, pelo que se apresentam estes valores no Quadro 6.2 para o interior e exterior da sala em estudo. Para uma melhor compreensão dos resultados é apresentada a Figura 6.2.

O isolamento sonoro bruto (D) obtido pela diferença entre os níveis de pressão sonora medidos no exterior e interior da sala evidencia a redução sonora bruta provocada pela parede na situação inicial. Assim sendo é apresentada a Figura 6.3 para uma melhor compreensão dos valores de redução sonora bruta que caracteriza a parede da sala (com as portas não tratadas).

Quadro 6.1 - Valores dos níveis de pressão sonora ( $L_{eq}$ ), para as bandas de frequência de 1/1 oitava, no interior e exterior da sala B024 em situação de ruído de fundo em período de aulas

Frequências (Hz)	31	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k	Global
$L_{eq}$ no interior da sala (dB)	38,9	42,9	41,2	41,6	41,0	36,2	32,7	29,8	23,9	51,3
$L_{eq}$ no exterior da sala (dB)	59,2	50,3	58,9	61,6	63,9	58,5	55,0	49,1	41,8	68,5
$D = (L_{eq. ext.} - L_{eq. int})$ (dB)	20,3	7,4	17,7	20,0	22,9	22,3	22,3	19,3	17,9	17,2

Quadro 6.2 - Valores dos níveis de pressão sonora corrigidos com filtro A ( $L_{Aeq}$ ), para as bandas de frequência de 1/1 oitava, no interior e exterior da sala B024 em situação de ruído de fundo em período de aulas

Frequências (Hz)	31	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k	Global
$L_{Aeq}$ no interior da sala (dB)	<0	16,9	25,7	33,1	38,0	36,2	33,7	30,8	22,9	42,1
$L_{Aeq}$ no exterior da sala (dB)	19,2	24,3	43,4	53,1	60,9	58,5	56,0	50,1	40,8	64,2
$D = (L_{Aeq. ext.} - L_{Aeq. int.})$ (dB)	20,3	7,4	17,7	20,0	22,9	22,3	22,3	19,3	17,9	22,1

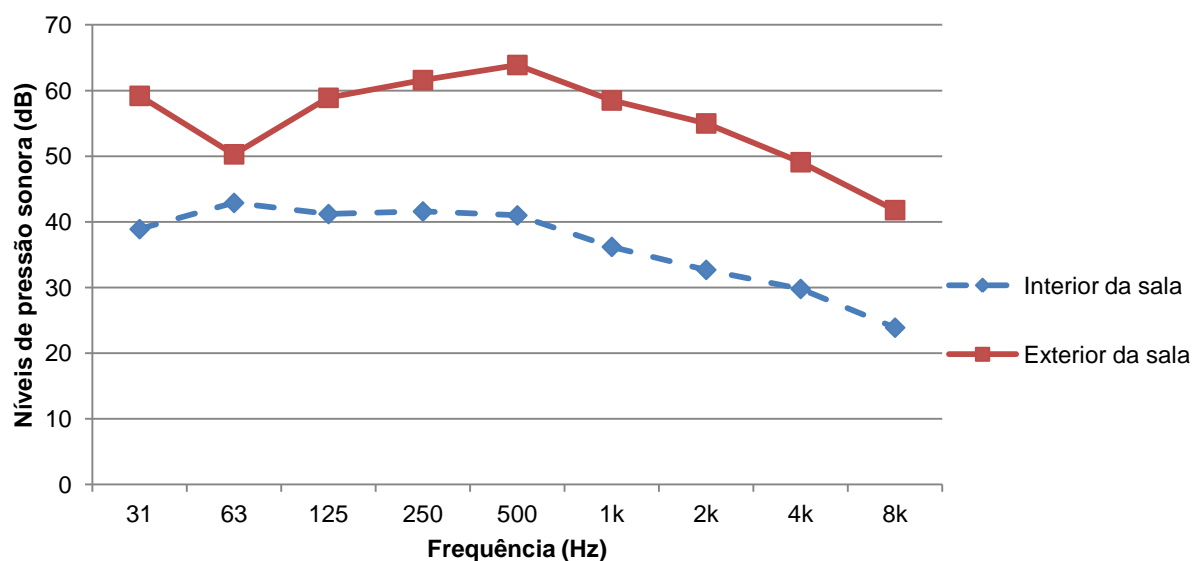


Figura 6.1 - Níveis de pressão sonora ( $L_{eq}$ ) no interior e exterior da sala B024 em situação de ruído de fundo em período de aulas

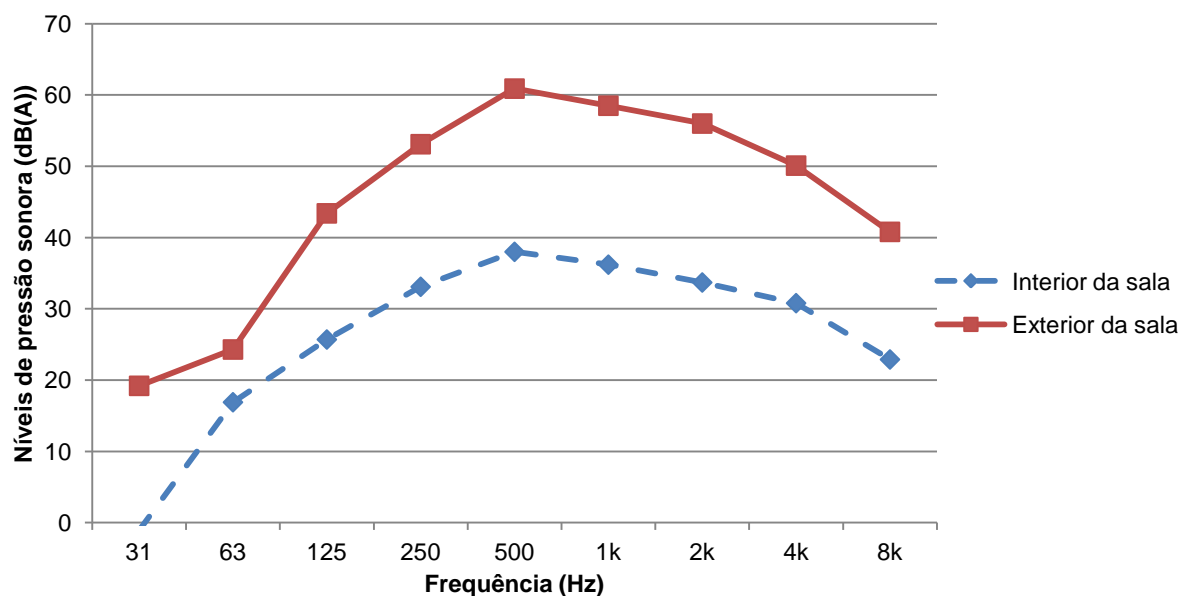


Figura 6.2 - Níveis de pressão sonora corrigidos com filtro A ( $L_{Aeq}$ ) no interior e exterior da sala B024 em situação de ruído de fundo em período de aulas

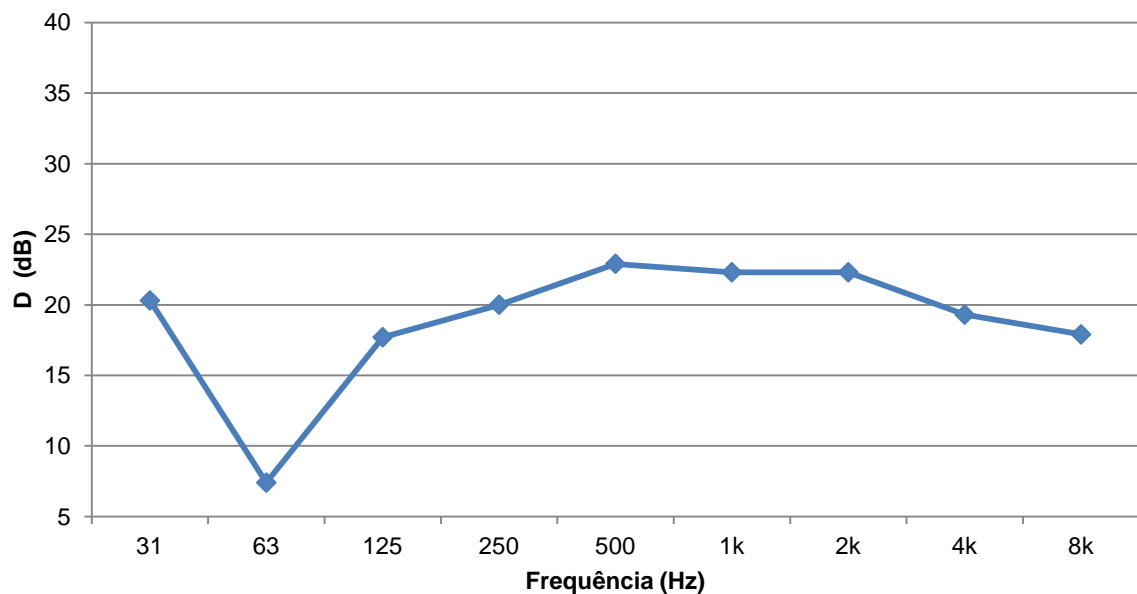


Figura 6.3 - Isolamento sonoro bruto (D) da parede divisória da sala B024 e corredor (com duas portas) em situação de ruído de fundo em período de aulas

A partir da análise dos Quadros 6.1 e 6.2 verifica-se que existe uma diminuição no valor do ruído de fundo do exterior para o interior da sala, de aproximadamente 17 dB e 22 dB(A). Para um espaço vocacionado à concentração e ao sossego, numa envolvente tão ruidosa o valor obtido é um valor baixo.

Um isolamento sonoro inferior a 30 dB permite que a voz normal pronunciada no exterior da sala possa ser compreendida com facilidade e de modo distinto no seu interior, o que irá provocar uma diminuição da concentração por parte dos alunos (Quadro 2.5). Para garantir que o processo de aprendizagem não seja comprometido, o isolamento sonoro ideal para a sala de aula deverá ser no mínimo de 36 dB.

Em suma, o valor obtido para os níveis de pressão sonora no interior da sala B024 em situação de ruído de fundo em período de aulas (51 dB e 42 dB(A)) é elevado. Este valor conduzirá a um aumento da intensidade da voz por parte do professor para compensar essa desvantagem, causando assim maior desgaste físico e psicológico e a desatenção e alheamento por parte dos alunos.

#### 6.1.2. TEMPO DE REVERBERAÇÃO

O valor do tempo de reverberação foi medido na primeira fase de medições (que se realizou no dia 02/04/2014 pelas 10 horas) na situação inicial (sem tratamento das frinchas existentes nas portas da sala B024).

Os valores obtidos nos diferentes pontos de medição são apresentados no Quadro 6.3. Além destes valores é apresentado também o valor médio obtido para as bandas de frequências 500/1k/2k Hz e o limite máximo estabelecido na legislação em vigor.

Deve referir-se que ao valor médio do tempo de reverberação medido, para as bandas de frequências 500/1k/2k Hz, na sala B024 aplicou-se a correção do fator de incerteza I ( $I=25\%$  do limite regulamentar) cf. indicado no artigo nº 7, ponto 5, alínea b), do RRAE de 2008, que se refere que ao

valor obtido do tempo de reverberação deverá ser diminuído do fator de incerteza I (I=25% do limite regulamentar) a ver se cumpre a legislação. Obtendo-se um tempo de reverberação médio cf. RRAE para a sala B024 de 1,6 s.

Quadro 6.3 - Resultados obtidos para o tempo de reverberação na sala B024

Frequência (Hz)	Pontos de Medição						Média por frequência (s)
	1	2	3	4	5	6	
63	3,59	1,94	2,22	1,98	2,47	2,76	2,49
125	2,00	1,62	2,06	2,14	2,03	1,69	1,92
250	1,92	1,93	1,92	2,06	1,95	2,08	1,98
500	1,87	1,89	1,92	1,89	2,01	1,81	1,90
1k	1,76	1,76	1,77	1,81	1,79	1,82	1,79
2k	1,76	1,73	1,79	1,73	1,83	1,78	1,77
4k	1,54	1,47	1,52	1,56	1,50	1,53	1,52
8k	1,03	1,02	0,99	1,04	1,00	1,02	1,02
TR médio (500, 1k Hz) = 1,8				TR médio (500, 1k, 2k Hz) = 1,8			
TR [500,1k, 2k Hz] (s)	Valor médio medido						1,8
	Valor médio medido cf. RRAE (-I=25% valor regulamentar)						1,6
	Valor máximo estabelecido no RRAE						0,8 (*)

(\*)  $TR = 0,15 \times V^{1/3}$

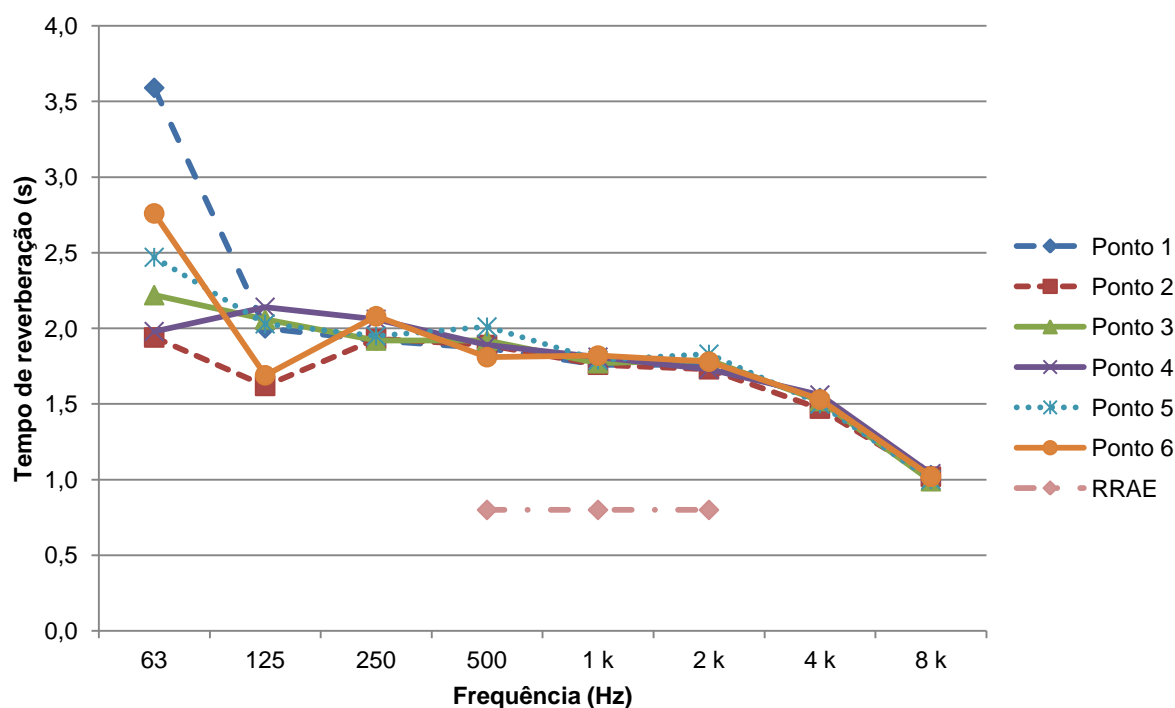


Figura 6.4 - Valores do tempo de reverberação (s) nos seis pontos de ensaio na sala B024 e o limite máximo cf. RRAE

Ao analisar o Quadro 6.3 constata-se que os valores do tempo de reverberação são mais elevados para as baixas do que nas altas frequências. Esta ocorrência pode advir da absorção do ar que é condicionante nas altas frequências. No entanto, mesmo nas altas o valor continua elevado quando comparado com o valor ideal, é o dobro do valor estabelecido no RRAE [38].

A Figura 6.4 evidência que, excetuando a gama de frequências dos 63 e 125 Hz, há uma forte homogeneidade para os valores obtidos nos diferentes pontos de medição.

### 6.1.3. RAPID SPEECH TRANSMISSION INDEX – RASTI

O valor do RASTI foi obtido na primeira fase de medições, que se realizou no dia 02/04/2014 pelas 10 horas. Para cada ponto de medição calculou-se a média aritmética das leituras do RASTI. Os resultados obtidos são apresentados no Quadro 6.4. Para uma melhor compreensão dos resultados na Figura 6.5 é apresentada a média de cada fila de lugares analisada e a média da sala em estudo.

Comparando os valores obtidos com a classificação normalizada (Quadro 3.3) verifica-se que para cada ponto analisado a inteligibilidade da palavra é razoável dentro dos mínimos aceitáveis e que diminui com a distância à fonte, embora de forma muito pouco significativa. Apesar da inteligibilidade da palavra no caso em estudo ter uma classificação subjetiva de “razoável” para uma sala de aula esta classificação deveria variar entre “boa” a “muito boa”.

Quadro 6.4 - Resultados do RASTI para a sala B024 em período de aulas

Pontos		Medições					Média	Média	Média da sala
		1ª	2ª	3ª	4ª	5ª			
1ª Fila	1/2 da sala	0,54	0,55	0,56	0,55	0,55	0,55	0,54	0,50
	1/4 da sala	0,52	0,53	0,52	0,50	0,52	0,52		
3ª Fila	1/2 da sala	0,50	0,49	0,49	0,50	0,50	0,50	0,49	
	1/4 da sala	0,47	0,48	0,48	0,49	0,48	0,48		
5ª Fila	1/2 da sala	0,46	0,47	0,48	0,46	0,47	0,47	0,47	
	1/4 da sala	0,45	0,46	0,47	0,45	0,46	0,46		

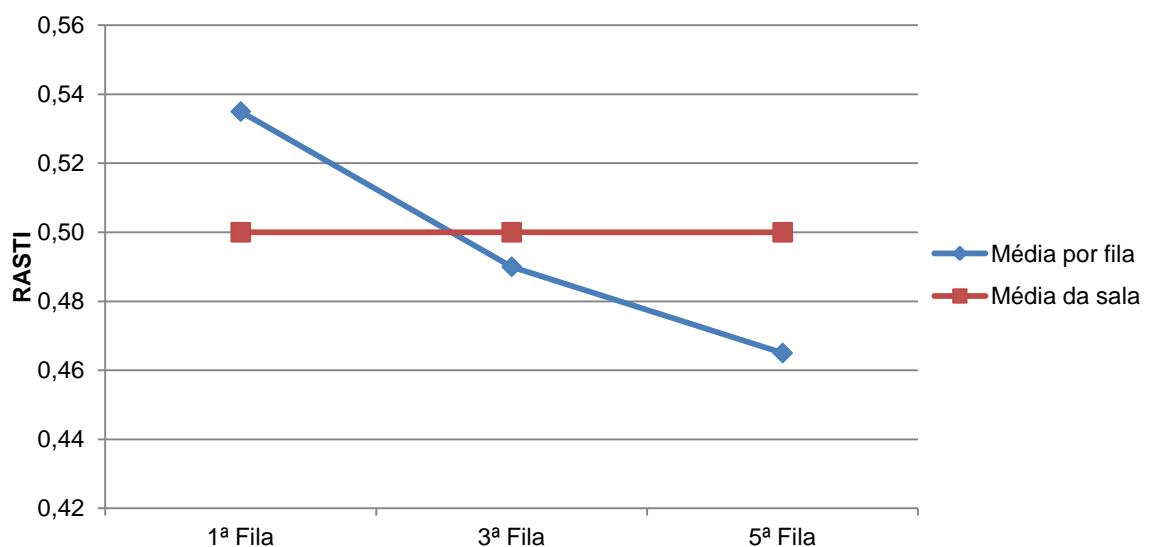


Figura 6.5 - Resultados do RASTI para a sala B024 em período de aulas

#### 6.1.4. ÍNDICE DE ISOLAMENTO SONORO A RUÍDOS DE CONDUÇÃO AÉREA PADRONIZADO

No dia 02/04/2014 pelas 19h mediram-se os níveis de pressão sonora no interior e exterior da sala B024 de modo a avaliar o seu índice de isolamento sonoro a ruídos aéreos padronizado. Os resultados obtidos são apresentados no Quadro 6.5. É apresentado o valor do índice de isolamento sonoro a ruídos aéreos da forma normalizada e com uma casa decimal (situação não normalizada). Este último é apresentado com uma casa decimal para maior precisão dos resultados e possibilitar uma comparação mais detalhada.

Quadro 6.5 - Valores médios dos níveis de pressão sonora no interior e exterior da sala B024 e o valor do índice de isolamento sonoro a ruídos de condução aérea

Frequências (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k
L Emissor (P1)	87,4	90,0	87,5	87,0	88,6	88,5	90,9	92,6	95,5	90,8	87,2	87,5	88,1	89,8	89,6	83,7
L Emissor (P2)	86,1	92,2	93,3	90,9	89,9	91,0	94,1	95,6	96,6	92,7	89,0	89,0	89,4	90,1	90,4	84,4
<b>Emissor (LE médio)</b>	<b>86,8</b>	<b>91,2</b>	<b>91,3</b>	<b>89,3</b>	<b>89,3</b>	<b>89,9</b>	<b>92,8</b>	<b>94,4</b>	<b>96,1</b>	<b>91,8</b>	<b>88,2</b>	<b>88,3</b>	<b>88,8</b>	<b>89,9</b>	<b>90,0</b>	<b>84,1</b>
L Recetor (P1)	78,3	78,7	73,3	68,7	71,6	71,7	73,7	73,1	73,5	69,4	65,4	64,4	64,5	66,3	67,9	62,7
L Recetor (P2)	72,9	69,7	73,7	71,2	70,6	70,5	72,1	72,6	74,2	70,2	64,9	63,8	64,3	66,4	68,5	63,4
<b>Recetor (LR médio)</b>	<b>76,4</b>	<b>76,2</b>	<b>73,5</b>	<b>70,1</b>	<b>71,1</b>	<b>71,1</b>	<b>73,0</b>	<b>72,9</b>	<b>73,9</b>	<b>69,8</b>	<b>65,1</b>	<b>64,1</b>	<b>64,4</b>	<b>66,3</b>	<b>68,2</b>	<b>63,0</b>
L R.F. Recetor	24,5	25,7	26,3	26,8	26,3	27,7	23,6	22,8	21,2	19,4	16,6	16,1	15,6	13,9	15,5	14,9
Valor final (LR')	76,4	76,2	73,5	70,1	71,1	71,1	73,0	72,9	73,9	69,8	65,1	64,1	64,4	66,3	68,2	63,0
<b>D= LE-LR'</b>	<b>10,4</b>	<b>15,0</b>	<b>17,8</b>	<b>19,2</b>	<b>18,2</b>	<b>18,8</b>	<b>19,8</b>	<b>21,5</b>	<b>22,2</b>	<b>22,0</b>	<b>23,0</b>	<b>24,2</b>	<b>24,4</b>	<b>23,6</b>	<b>21,9</b>	<b>21,0</b>
<b>TR Recetor (s)</b>	<b>2,12</b>	<b>1,92</b>	<b>1,69</b>	<b>1,59</b>	<b>1,98</b>	<b>2,17</b>	<b>2,24</b>	<b>1,90</b>	<b>1,80</b>	<b>1,86</b>	<b>1,79</b>	<b>1,80</b>	<b>1,89</b>	<b>1,77</b>	<b>1,58</b>	<b>1,52</b>
F.C.= 10*log(TR/TR0) (dB)	6,27	5,84	5,29	5,02	5,98	6,37	6,51	5,80	5,56	5,71	5,54	5,56	5,77	5,49	5,00	4,83
DnT (dB)	16,7	15,5	18,0	19,4	18,4	19,0	20,0	21,6	22,3	22,1	23,1	24,3	24,4	23,7	22,0	21,1
<b>DnT,w (dB)</b>	<b>23</b>															
<b>DnT,wd (dB) (*)</b>	<b>23,1</b>															

(\*) Valor não normativo (unicamente para permitir maior detalhe na análise).

## 6.2. SITUAÇÃO COM TRATAMENTO DAS FRINCHAS

A segunda fase de medições realizou-se no dia 09/04/2014 pelas 20 horas. Nesta fase procedeu-se ao tratamento das frinchas existentes em todo o perímetro das duas portas.

Inicialmente procedeu-se à colmatação das frinchas laterais e superiores das duas portas da sala B024. O material escolhido foi um perfil de calafetagem autoadesivo em borracha com um formato em P (Figura 6.6). É de salientar que a porta P1 ficou ligeiramente empenada após a colocação deste material uma vez que foi necessário limar o aro na zona da fechadura para a mesma poder fechar. Na Figura 6.7 pode-se observar o estado final da porta P1. Posto isto, é possível verificar uma pequena diferença nos níveis de pressão sonora obtidos no interior da sala, o recetor P1 apresenta valores ligeiramente superiores ao recetor P2.





Figura 6.6 - Isolamento da frincha lateral e superior das portas da sala B024 [Fotografia da autora]



Figura 6.7 - Empeno na porta P1 da sala B024 [Fotografias da autora]

De seguida isolou-se a frincha inferior da porta, para a qual foram escolhidos quatro materiais diferentes com o intuito de averiguar qual deles seria o mais eficiente. Os materiais utilizados encontram-se descritos no Quadro 6.6. Esta escolha baseou-se na utilização de materiais usuais no mercado e com proveito para a acústica. São facilmente adquiridos em armazéns de material para construção ou até mesmo em hipermercados.

O Quadro 6.6 apresenta a descrição das diferentes situações, de materiais utilizados para a colmatação das frinchas existentes no perímetro das portas, para as quais se procedeu à medição dos níveis de pressão sonora no interior da sala e posterior análise do índice de isolamento sonoro a ruídos de condução aérea.

Os resultados referentes ao índice de isolamento sonoro a ruídos de condução aérea são apresentados também com uma casa decimal (não normativo) de modo a se poder verificar com maior precisão as diferenças obtidas para os diferentes materiais utilizados na colmatação das frinchas (DnT,wd).

Nos Quadros 6.8 a 6.12 são apresentados os resultados normalizados e não normalizados alusivos ao  $D_{nT,w}$  para as situações FL, FL+RD, FL+E, FL+P e FL+B respetivamente.

As siglas usadas representam o seguinte:

FL – Frincha lateral;

FL+RD – Frincha lateral + Rolo duplo;

FL+E – Frincha lateral + Escova;

FL+P – Frincha lateral + PVC adesivo;

FL+B – Frincha lateral + Borracha adesiva.

Quadro 6.6 - Materiais utilizados para calafetar a frincha inferior das portas da sala B024

Materiais	Imagem final após colocação do material	Pormenor do material
<p>Tesa MOLL</p> <p>Rolo duplo (RD)</p>		
<p>Tesa MOLL</p> <p>Escova adesiva (E)</p>		
<p>Tesa MOLL</p> <p>PVC adesivo (P)</p>		
<p>AXTON</p> <p>Borracha adesiva (B)</p>		

Quadro 6.7 - Descrição das situações consideradas para a análise do índice de isolamento sonoro a ruídos de condução aérea

Situação	Material utilizado para a colmatação das frinchas laterais e superior	Material utilizado para a colmatação da frincha inferior
FL	Borracha adesiva <i>Tesa MOLL</i>	-
FL+RD	Borracha adesiva <i>Tesa MOLL</i>	Rolo duplo (RD) <i>Tesa MOLL</i>
FL+E	Borracha adesiva <i>Tesa MOLL</i>	Escova adesiva (E) <i>Tesa MOLL</i>
FL+P	Borracha adesiva <i>Tesa MOLL</i>	PVC adesivo (P) <i>Tesa MOLL</i>
FL+B	Borracha adesiva <i>Tesa MOLL</i>	Borracha adesiva (B) <i>AXTON</i>

Quadro 6.8 - Valores médios dos níveis de pressão sonora no interior e exterior da sala B024 e o valor do índice de isolamento sonoro a ruídos de condução aérea na situação FL

Frequência (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k
L Emissor (P1)	84,1	87,1	89,5	92,1	87,8	88,0	91,4	94,3	95,0	91,2	87,8	88,4	89,0	89,7	88,5	82,6
L Emissor (P2)	84,9	90,5	88,6	91,5	89,6	90,4	92,8	94,4	96,2	91,6	87,8	89,1	89,4	89,4	88,7	82,7
<b>Emissor (LE médio)</b>	<b>84,5</b>	<b>89,1</b>	<b>89,1</b>	<b>91,8</b>	<b>88,8</b>	<b>89,4</b>	<b>92,1</b>	<b>94,4</b>	<b>95,7</b>	<b>91,4</b>	<b>87,8</b>	<b>88,7</b>	<b>89,2</b>	<b>89,6</b>	<b>88,6</b>	<b>82,7</b>
L Recetor (P1)	72,2	74,7	71,4	71,5	68,0	68,6	70,9	72,6	71,4	67,4	63,8	64,0	64,3	64,6	64,2	59,8
L Recetor (P2)	72,1	67,0	69,4	65,7	66,9	67,6	69,1	69,4	72,5	68,8	63,4	62,6	63,3	63,3	63,4	59,1
<b>Recetor (LR médio)</b>	<b>72,1</b>	<b>72,4</b>	<b>70,5</b>	<b>69,5</b>	<b>67,5</b>	<b>68,1</b>	<b>70,1</b>	<b>71,3</b>	<b>72,0</b>	<b>68,1</b>	<b>63,6</b>	<b>63,4</b>	<b>63,8</b>	<b>64,0</b>	<b>63,8</b>	<b>59,4</b>
L R.F. Recetor	24,5	25,7	26,3	26,8	26,3	27,7	23,6	22,8	21,2	19,4	16,6	16,1	15,6	13,9	15,5	14,9
Valor final (LR')	72,1	72,4	70,5	69,5	67,5	68,1	70,1	71,3	72,0	68,1	63,6	63,4	63,8	64,0	63,8	59,4
<b>D= LE- LR'</b>	<b>12,4</b>	<b>16,7</b>	<b>18,5</b>	<b>22,3</b>	<b>21,3</b>	<b>21,3</b>	<b>22,0</b>	<b>23,1</b>	<b>23,7</b>	<b>23,2</b>	<b>24,2</b>	<b>25,4</b>	<b>25,4</b>	<b>25,6</b>	<b>24,8</b>	<b>23,2</b>
<b>TR Recetor (s)</b>	<b>2,12</b>	<b>1,92</b>	<b>1,69</b>	<b>1,59</b>	<b>1,98</b>	<b>2,17</b>	<b>2,24</b>	<b>1,90</b>	<b>1,80</b>	<b>1,86</b>	<b>1,79</b>	<b>1,80</b>	<b>1,89</b>	<b>1,77</b>	<b>1,58</b>	<b>1,52</b>
F.C.= 10*log(TR/TR0) (dB)	6,27	5,84	5,29	5,02	5,98	6,37	6,51	5,80	5,56	5,71	5,54	5,56	5,77	5,49	5,00	4,83
DnT (dB)	18,7	17,0	18,7	22,4	21,4	21,4	22,2	23,2	23,7	23,3	24,2	25,4	25,4	25,6	24,8	23,3
<b>DnT,w (dB)</b>	<b>24</b>															
<b>DnT,wd (dB) (*)</b>	<b>24,8</b>															

(\*) Valor não normativo (unicamente para permitir maior detalhe na análise).

Quadro 6.9 - Valores médios dos níveis de pressão sonora no interior e exterior da sala B024 e o valor do índice de isolamento sonoro a ruídos de condução aérea na situação FL+RD

Frequência (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k
L Emissor (P1)	84,1	87,1	89,5	92,1	87,8	88,0	91,4	94,3	95,0	91,2	87,8	88,4	89,0	89,7	88,5	82,6
L Emissor (P2)	84,9	90,5	88,6	91,5	89,6	90,4	92,8	94,4	96,2	91,6	87,8	89,1	89,4	89,4	88,7	82,7
<b>Emissor (LE médio)</b>	<b>84,5</b>	<b>89,1</b>	<b>89,1</b>	<b>91,8</b>	<b>88,8</b>	<b>89,4</b>	<b>92,1</b>	<b>94,4</b>	<b>95,7</b>	<b>91,4</b>	<b>87,8</b>	<b>88,7</b>	<b>89,2</b>	<b>89,6</b>	<b>88,6</b>	<b>82,7</b>
L Recetor (P1)	71,0	73,0	69,5	69,4	66,5	67,0	69,2	70,6	69,5	65,7	62,1	61,8	62,8	62,7	60,8	54,8
L Recetor (P2)	70,2	65,7	67,2	63,0	64,4	64,7	66,1	66,4	70,1	67,3	61,9	60,3	60,7	59,6	58,0	51,8
<b>Recetor (LR médio)</b>	<b>70,6</b>	<b>70,8</b>	<b>68,5</b>	<b>67,3</b>	<b>65,6</b>	<b>66,0</b>	<b>67,9</b>	<b>69,0</b>	<b>69,8</b>	<b>66,6</b>	<b>62,0</b>	<b>61,1</b>	<b>61,8</b>	<b>61,4</b>	<b>59,6</b>	<b>53,5</b>
L R.F. Recetor	24,5	25,7	26,3	26,8	26,3	27,7	23,6	22,8	21,2	19,4	16,6	16,1	15,6	13,9	15,5	14,9
Valor final (LR')	70,6	70,8	68,5	67,3	65,6	66,0	67,9	69,0	69,8	66,6	62,0	61,1	61,8	61,4	59,6	53,5
<b>D= LE - LR'</b>	<b>13,9</b>	<b>18,3</b>	<b>20,6</b>	<b>24,5</b>	<b>23,2</b>	<b>23,4</b>	<b>24,2</b>	<b>25,4</b>	<b>25,8</b>	<b>24,8</b>	<b>25,8</b>	<b>27,6</b>	<b>27,3</b>	<b>28,1</b>	<b>28,9</b>	<b>29,1</b>
<b>TR Recetor (s)</b>	<b>2,12</b>	<b>1,92</b>	<b>1,69</b>	<b>1,59</b>	<b>1,98</b>	<b>2,17</b>	<b>2,24</b>	<b>1,90</b>	<b>1,80</b>	<b>1,86</b>	<b>1,79</b>	<b>1,80</b>	<b>1,89</b>	<b>1,77</b>	<b>1,58</b>	<b>1,52</b>
F.C.= 10*log(TR/TR0) (dB)	6,27	5,84	5,29	5,02	5,98	6,37	6,51	5,80	5,56	5,71	5,54	5,56	5,77	5,49	5,00	4,83
DnT (dB)	20,2	18,6	20,7	24,6	23,3	23,5	24,3	25,4	25,9	24,8	25,8	27,6	27,3	28,2	29,0	29,1
<b>DnT,w (dB)</b>	<b>27</b>															
<b>DnT,wd (dB) (*)</b>	<b>27,4</b>															

(\*) Valor não normativo (unicamente para permitir maior detalhe na análise).

Quadro 6.10 - Valores médios dos níveis de pressão sonora no interior e exterior da sala B024 e o valor do índice de isolamento sonoro a ruídos de condução aérea na situação FL+E

Frequência (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k
L Emissor (P1)	84,1	87,1	89,5	92,1	87,8	88,0	91,4	94,3	95,0	91,2	87,8	88,4	89,0	89,7	88,5	82,6
L Emissor (P2)	84,9	90,5	88,6	91,5	89,6	90,4	92,8	94,4	96,2	91,6	87,8	89,1	89,4	89,4	88,7	82,7
<b>Emissor (LE médio)</b>	<b>84,5</b>	<b>89,1</b>	<b>89,1</b>	<b>91,8</b>	<b>88,8</b>	<b>89,4</b>	<b>92,1</b>	<b>94,4</b>	<b>95,7</b>	<b>91,4</b>	<b>87,8</b>	<b>88,7</b>	<b>89,2</b>	<b>89,6</b>	<b>88,6</b>	<b>82,7</b>
L Recetor (P1)	69,4	72,4	69,3	68,7	66,6	66,9	70,1	70,5	70,3	66,0	61,7	61,4	62,6	63,6	64,0	57,7
L Recetor (P2)	70,8	66,5	68,2	64,1	65,4	66,1	67,4	67,7	71,3	67,9	62,8	61,8	62,9	63,2	61,6	54,7
<b>Recetor (LR médio)</b>	<b>70,2</b>	<b>70,3</b>	<b>68,8</b>	<b>67,0</b>	<b>66,0</b>	<b>66,5</b>	<b>69,0</b>	<b>69,3</b>	<b>70,9</b>	<b>67,0</b>	<b>62,2</b>	<b>61,6</b>	<b>62,7</b>	<b>63,4</b>	<b>63,0</b>	<b>56,4</b>
L R.F. Recetor	24,5	25,7	26,3	26,8	26,3	27,7	23,6	22,8	21,2	19,4	16,6	16,1	15,6	13,9	15,5	14,9
Valor final (LR')	70,2	70,3	68,8	67,0	66,0	66,5	69,0	69,3	70,9	67,0	62,2	61,6	62,7	63,4	63,0	56,4
<b>D= LE - LR'</b>	<b>14,3</b>	<b>18,7</b>	<b>20,3</b>	<b>24,8</b>	<b>22,7</b>	<b>22,9</b>	<b>23,2</b>	<b>25,1</b>	<b>24,8</b>	<b>24,3</b>	<b>25,5</b>	<b>27,1</b>	<b>26,4</b>	<b>26,1</b>	<b>25,6</b>	<b>26,2</b>
<b>TR Recetor (s)</b>	<b>2,12</b>	<b>1,92</b>	<b>1,69</b>	<b>1,59</b>	<b>1,98</b>	<b>2,17</b>	<b>2,24</b>	<b>1,90</b>	<b>1,80</b>	<b>1,86</b>	<b>1,79</b>	<b>1,80</b>	<b>1,89</b>	<b>1,77</b>	<b>1,58</b>	<b>1,52</b>
F.C.= 10*log(TR/TR0) (dB)	6,27	5,84	5,29	5,02	5,98	6,37	6,51	5,80	5,56	5,71	5,54	5,56	5,77	5,49	5,00	4,83
DnT (dB)	20,6	19,0	20,4	24,8	22,8	23,0	23,2	25,1	24,9	24,4	25,6	27,2	26,5	26,2	25,6	26,3
<b>DnT,w (dB)</b>	<b>26</b>															
<b>DnT,wd (dB) (*)</b>	<b>26,1</b>															

(\*) Valor não normativo (unicamente para permitir maior detalhe na análise).

Quadro 6.11 - Valores médios dos níveis de pressão sonora no interior e exterior da sala B024 e o valor do índice de isolamento sonoro a ruídos de condução aérea na situação FL+P

Frequência (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k
L Emissor (P1)	84,1	87,1	89,5	92,1	87,8	88,0	91,4	94,3	95,0	91,2	87,8	88,4	89,0	89,7	88,5	82,6
L Emissor (P2)	84,9	90,5	88,6	91,5	89,6	90,4	92,8	94,4	96,2	91,6	87,8	89,1	89,4	89,4	88,7	82,7
<b>Emissor (LE médio)</b>	<b>84,5</b>	<b>89,1</b>	<b>89,1</b>	<b>91,8</b>	<b>88,8</b>	<b>89,4</b>	<b>92,1</b>	<b>94,4</b>	<b>95,7</b>	<b>91,4</b>	<b>87,8</b>	<b>88,7</b>	<b>89,2</b>	<b>89,6</b>	<b>88,6</b>	<b>82,7</b>
L Recetor (P1)	69,6	72,9	68,3	68,8	65,5	66,4	69,2	69,1	69,1	65,0	60,8	60,7	61,7	62,3	61,8	54,7
L Recetor (P2)	70,9	65,9	67,6	64,1	64,7	65,4	66,8	67,2	70,3	67,3	61,5	60,3	61,2	62,3	61,0	53,4
<b>Recetor (LR médio)</b>	<b>70,3</b>	<b>70,7</b>	<b>68,0</b>	<b>67,1</b>	<b>65,1</b>	<b>65,9</b>	<b>68,1</b>	<b>68,3</b>	<b>69,7</b>	<b>66,3</b>	<b>61,2</b>	<b>60,5</b>	<b>61,4</b>	<b>62,3</b>	<b>61,4</b>	<b>54,1</b>
L R.F. Recetor	24,5	25,7	26,3	26,8	26,3	27,7	23,6	22,8	21,2	19,4	16,6	16,1	15,6	13,9	15,5	14,9
Valor final (LR')	70,3	70,7	68,0	67,1	65,1	65,9	68,1	68,3	69,7	66,3	61,2	60,5	61,4	62,3	61,4	54,1
<b>D= LE-LR'</b>	<b>14,2</b>	<b>18,4</b>	<b>21,1</b>	<b>24,7</b>	<b>23,6</b>	<b>23,4</b>	<b>24,0</b>	<b>26,1</b>	<b>26,0</b>	<b>25,1</b>	<b>26,6</b>	<b>28,2</b>	<b>27,7</b>	<b>27,3</b>	<b>27,2</b>	<b>28,6</b>
<b>TR Recetor (s)</b>	<b>2,12</b>	<b>1,92</b>	<b>1,69</b>	<b>1,59</b>	<b>1,98</b>	<b>2,17</b>	<b>2,24</b>	<b>1,90</b>	<b>1,80</b>	<b>1,86</b>	<b>1,79</b>	<b>1,80</b>	<b>1,89</b>	<b>1,77</b>	<b>1,58</b>	<b>1,52</b>
F.C.= 10*log(TR/TR0) (dB)	6,27	5,84	5,29	5,02	5,98	6,37	6,51	5,80	5,56	5,71	5,54	5,56	5,77	5,49	5,00	4,83
DnT (dB)	20,5	18,6	21,2	24,7	23,7	23,5	24,1	26,1	26,0	25,1	26,6	28,2	27,7	27,3	27,2	28,6
<b>DnT,w (dB)</b>	<b>27</b>															
<b>DnT,wd (dB) (*)</b>	<b>27,4</b>															

(\*) Valor não normativo (unicamente para permitir maior detalhe na análise).

Quadro 6.12 - Valores médios dos níveis de pressão sonora no interior e exterior da sala B024 e o valor do índice de isolamento sonoro a ruídos de condução aérea na situação FL+B

Frequência (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k
L Emissor (P1)	84,1	87,1	89,5	92,1	87,8	88,0	91,4	94,3	95,0	91,2	87,8	88,4	89,0	89,7	88,5	82,6
L Emissor (P2)	84,9	90,5	88,6	91,5	89,6	90,4	92,8	94,4	96,2	91,6	87,8	89,1	89,4	89,4	88,7	82,7
<b>Emissor (LE médio)</b>	<b>84,5</b>	<b>89,1</b>	<b>89,1</b>	<b>91,8</b>	<b>88,8</b>	<b>89,4</b>	<b>92,1</b>	<b>94,4</b>	<b>95,7</b>	<b>91,4</b>	<b>87,8</b>	<b>88,7</b>	<b>89,2</b>	<b>89,6</b>	<b>88,6</b>	<b>82,7</b>
L Recetor (P1)	70,5	73,1	68,6	68,5	65,1	66,4	69,0	69,6	70,1	65,8	61,3	60,9	61,7	63,0	63,5	55,1
L Recetor (P2)	70,4	66,1	67,3	63,9	64,4	65,3	66,3	66,3	69,8	67,0	61,5	59,7	60,6	61,0	59,4	52,3
<b>Recetor (LR médio)</b>	<b>70,4</b>	<b>70,9</b>	<b>68,0</b>	<b>66,8</b>	<b>64,8</b>	<b>65,9</b>	<b>67,9</b>	<b>68,3</b>	<b>69,9</b>	<b>66,5</b>	<b>61,4</b>	<b>60,3</b>	<b>61,2</b>	<b>62,1</b>	<b>61,9</b>	<b>53,9</b>
L R.F. Recetor	24,5	25,7	26,3	26,8	26,3	27,7	23,6	22,8	21,2	19,4	16,6	16,1	15,6	13,9	15,5	14,9
Valor final (LR')	70,4	70,9	68,0	66,8	64,8	65,9	67,9	68,3	69,9	66,5	61,4	60,3	61,2	62,1	61,9	53,9
<b>D= LE-LR'</b>	<b>14,0</b>	<b>18,2</b>	<b>21,0</b>	<b>25,0</b>	<b>24,0</b>	<b>23,5</b>	<b>24,3</b>	<b>26,1</b>	<b>25,7</b>	<b>24,9</b>	<b>26,4</b>	<b>28,4</b>	<b>28,0</b>	<b>27,5</b>	<b>26,6</b>	<b>28,8</b>
<b>TR Recetor (s)</b>	<b>2,12</b>	<b>1,92</b>	<b>1,69</b>	<b>1,59</b>	<b>1,98</b>	<b>2,17</b>	<b>2,24</b>	<b>1,90</b>	<b>1,80</b>	<b>1,86</b>	<b>1,79</b>	<b>1,80</b>	<b>1,89</b>	<b>1,77</b>	<b>1,58</b>	<b>1,52</b>
F.C.= 10*log(TR/TR0) (dB)	6,27	5,84	5,29	5,02	5,98	6,37	6,51	5,80	5,56	5,71	5,54	5,56	5,77	5,49	5,00	4,83
DnT (dB)	20,3	18,4	21,2	25,0	24,1	23,6	24,3	26,2	25,8	24,9	26,4	28,4	28,0	27,5	26,7	28,8
<b>DnT,w (dB)</b>	<b>27</b>															
<b>DnT,wd (dB) (*)</b>	<b>27,4</b>															

(\*) Valor não normativo (unicamente para permitir maior detalhe na análise).

O Quadro 6.13 apresenta os resultados do índice de isolamento sonoro a ruídos de condução aérea normalizado e não normalizado. Neste caso os resultados são apresentados com uma casa decimal para as diferentes situações analisadas, com o intuito de ter uma maior precisão nos resultados obtidos por forma a verificar indubitavelmente qual a situação mais eficiente. Para uma melhor compreensão dos resultados é apresentada a Figura 6.8.

Quadro 6.13 - Resultado do índice de isolamento sonoro a ruídos de condução aérea para as diferentes situações analisadas para a separação entre a sala B024 e o corredor

Situação	Material utilizado	DnT,w (dB)	DnT,wd (dB) (*)	$\Delta D$ (dB)	$\Delta D_d$ (dB) (*)
Inicial	-	23	23,1	-	-
FL	Borracha adesiva	24	24,8	1	1,7
FL+RD	Borracha adesiva + Rolo duplo	27	27,4	4	4,3
FL+E	Borracha adesiva + Escova	26	26,1	3	3,0
FL+P	Borracha adesiva + PVC adesivo	27	27,4	4	4,3
FL+B	Borracha adesiva + Borracha adesiva	27	27,4	4	4,3

(\*) Valor não normativo (unicamente para permitir maior detalhe na análise).

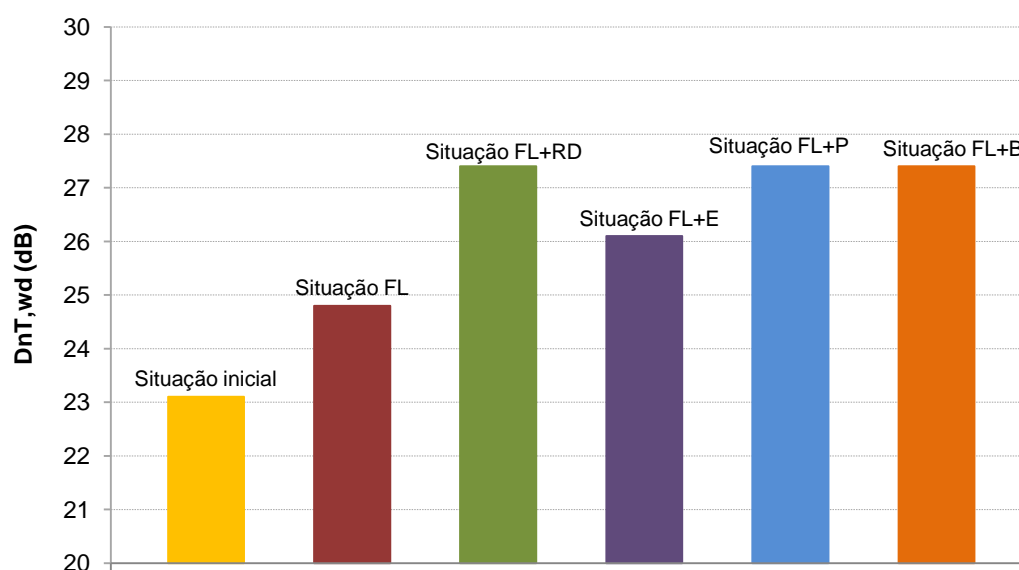


Figura 6.8 - Índice de isolamento sonoro (não normalizado) a ruídos de condução aérea para as diferentes situações analisadas

Para uma melhor compreensão dos resultados decompostos anteriormente, por forma a identificar claramente qual a melhor solução de isolamento, a Figura 6.9 apresenta as diferenças do índice de isolamento sonoro relativamente à situação inicial para as diferentes soluções de isolamento estudadas.

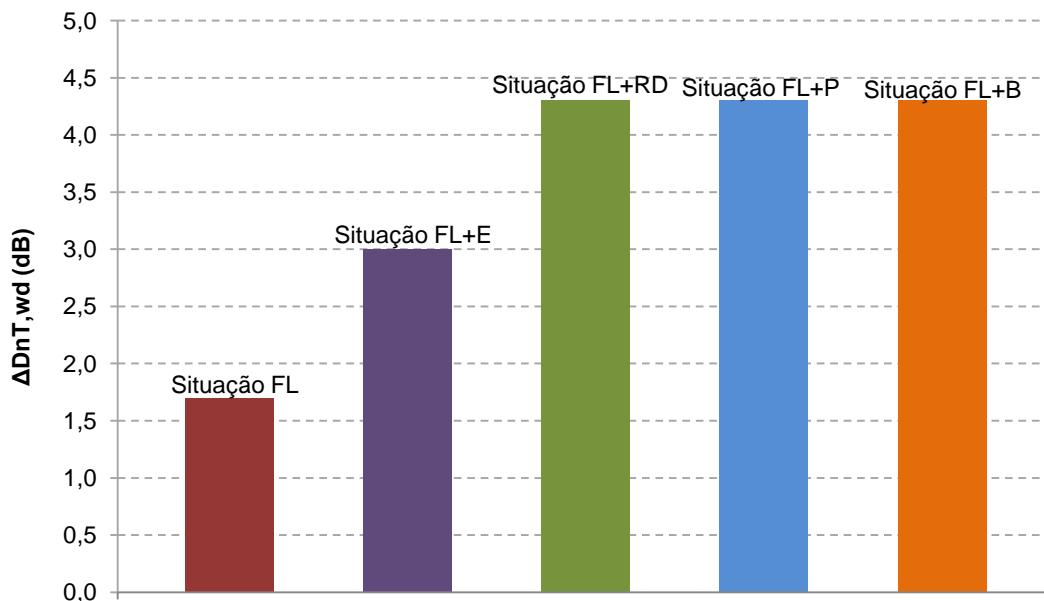


Figura 6.9 - Ordem crescente do aumento face à situação inicial do índice de isolamento sonoro não normalizado para as diferentes situações analisadas

Ao analisar o Quadro 6.13 e Figura 6.9 é possível verificar que com a aplicação dos materiais isolantes nas frinchas das portas o valor do isolamento sonoro melhorou. Sabendo que na situação inicial o valor do isolamento sonoro (não normalizado) era de 23,1 dB com a aplicação do isolamento sonoro apenas no aro da porta (situação FL) este valor aumentou 1,7 dB tendo melhorado posteriormente com o isolamento das frinchas inferiores. Dos materiais adotados para o isolamento das frinchas inferiores os que apresentaram melhores resultados foram os adotados nas situações FL+RD, FL+P e FL+B (Rolo duplo, PVC adesivo e Borracha adesiva, respetivamente) com um aumento de 4,3 dB e por último com um aumento de 2,9 dB tem-se a situação FL+E (Escova adesiva). Note-se que as situações FL+RD, FL+P, FL+B e FL+E contribuem para uma redução significativa da energia sonora transmitida para o interior da sala, reduzindo-a para menos de metade.

Conclui-se portanto, que a melhor solução em termos de aumento do índice de isolamento sonoro a ruídos aéreos é a colocação de uma das seguintes situações: FL+RD (Rolo Duplo), FL+P (PVC adesivo) ou FL+B (Borracha adesiva).

Para além do índice de isolamento sonoro é necessário analisar o decréscimo dos níveis de pressão sonora para as diferentes situações analisadas relativamente à situação inicial (sem isolamento) no interior da sala em análise. No Quadro 6.14 são apresentadas as diferenças dos níveis de pressão sonora para as diferentes situações de isolamento relativamente à situação inicial. Para um melhor entendimento dos resultados é apresentada a Figura 6.10.

Quadro 6.14 - Diferença dos níveis de pressão sonora recebidos no interior da sala para as diferentes situações de isolamento analisadas relativamente à situação inicial

Frequência (Hz)	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	$\Delta L_{\text{Globais}}^*$ (dB)	$\Delta L_{\text{Globais}}^{**}$ (dB(A))
$\Delta L_{\text{FL}}$	1,6	1,9	1,7	1,5	0,8	0,6	2,3	4,4	3,6	2,7	2,2
$\Delta L_{\text{FL+RD}}$	3,9	4,0	3,2	3,1	3,0	2,6	4,9	8,5	9,5	4,7	4,5
$\Delta L_{\text{FL+E}}$	3,5	3,0	2,8	2,9	2,5	1,7	2,9	5,2	6,6	4,4	3,5
$\Delta L_{\text{FL+P}}$	4,6	4,2	3,5	4,0	3,6	3,0	4,0	6,7	9,0	4,9	4,6
$\Delta L_{\text{FL+B}}$	4,6	3,9	3,4	3,7	3,8	3,3	4,2	6,2	9,1	4,9	4,5

(\*)  $\Delta L = L_{\text{Recetor para a situação inicial}} - L_{\text{Recetor para cada situação}}$ ; (\*\*)  $\Delta L_A = L_{A\text{Recetor para a situação inicial}} - L_{A\text{Recetor para cada situação}}$ .

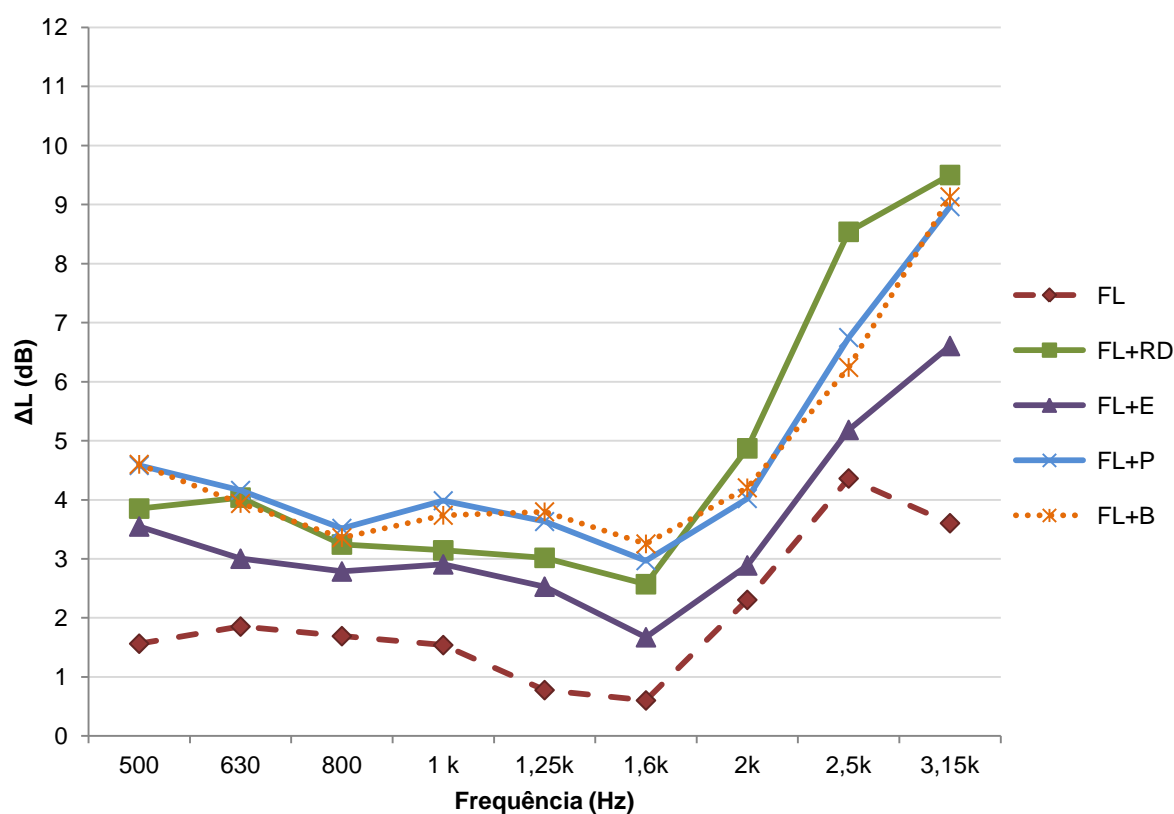


Figura 6.10 - Diferença dos níveis de pressão sonora (exterior – interior) para as diferentes situações de isolamento da sala B024 analisadas relativamente à situação inicial

Ao analisar a Figura 6.10 verifica-se que a situação FL diminuiu ligeiramente os níveis de pressão sonora no interior da sala. Dos 630 aos 1600 Hz a eficácia desta situação diminui ligeiramente melhorando dos 1600 até aos 2500 Hz, atingindo uma diminuição máxima do nível de pressão sonora nos 2500 Hz de 4,4 dB. Para os 3150 Hz verifica-se que há um aumento dos níveis de pressão sonora no interior da sala, existindo uma melhoria dos níveis de pressão sonora de apenas 3,6 dB.



Para a situação FL+RD há uma diminuição máxima dos níveis de pressão sonora nos 3150 Hz de 9,5 dB, sendo a melhor solução para a gama de frequências dos 2000 aos 3150 Hz. Esta solução é a mais eficaz para as altas frequências.

A situação FL+P tem um comportamento e uma eficácia muito próxima da solução FL+B, isto é, tanto uma solução como outra tem uma eficácia intermédia relativamente às situações analisadas.

Na situação FL+E verifica-se uma melhoria relativamente à situação FL, sendo assim a segunda classificada por ordem decrescente de eficácia. Tem uma eficácia máxima de 6,6 dB aos 3150 Hz e uma eficácia mínima aos 1600 Hz de 1,7 dB.

Observando genericamente a Figura 6.10, para as situações FL+RD, FL+P e FL+B verifica-se que existe uma maior diminuição dos níveis de pressão sonora no interior da sala quando comparadas com as situações FL e FL+E. Analisando as diferentes situações verifica-se que até aos 1000 Hz a situação FL+P é a mais eficaz seguindo-se as situações FL+B, FL+RD e FL+E. Em seguida dos 1250 aos 1600 Hz verifica-se que tanto a situação FL+B e FL+P são as mais eficazes seguindo-se as situações FL+RD e FL+E, a partir dos 1600 Hz a situação mais eficaz é a situação FL+RD seguindo-se a situação FL+P, FL+B, FL+E e por último como se verifica para as restantes frequências tem-se a situação FL.

Analisando globalmente a diferença dos níveis de pressão sonora no interior da sala, e tendo especial atenção a gama de frequências dos 2000 aos 3150 Hz a melhor solução seria a situação FL+RD, contribuindo para uma boa perceção dos discursos desenvolvidos no interior da sala de aula (B024), seguindo-se a situação FL+P, FL+B, FL+E e por último com menor eficácia a situação FL.



# 7

## COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS

### 7.1. COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS PARA AS DIFERENTES SITUAÇÕES DE ISOLAMENTO COM DIFERENTES LEGISLAÇÕES

Por forma a avaliar os resultados do tempo de reverberação, do índice de isolamento sonoro a ruídos de condução aérea e o RASTI existentes, com as várias disposições regulamentares já apresentadas no subcapítulo 3.5, o Quadro 7.1 apresenta os resultados dos parâmetros avaliados referentes às diferentes situações de isolamento analisadas e os resultados para cada país, conforme a sua legislação. Alguns desses resultados já se encontram mencionados no Quadro 3.15.

O valor referente ao índice de isolamento sonoro a ruídos de condução aérea apresentado no Quadro 7.1 é acrescido do fator de incerteza  $I$  ( $I=3\text{ dB}$ ) cf. indicado no artigo nº 7, ponto 5, alínea a), do RRAE de 2008, que se refere ao valor obtido do índice de isolamento sonoro a ruídos de condução aérea deve ser aumentado do fator de incerteza  $I$  ( $I=3\text{ dB}$ ).

Analisando o Quadro 7.1 verifica-se que grande parte dos resultados obtidos para a sala em estudo não cumpre os requisitos estabelecidos nos países em análise. Apenas algumas situações de isolamento com correção das frinchas possuem valores do índice de isolamento sonoro a ruídos de condução aérea que se encontram dentro do limite estabelecido na legislação portuguesa.

Quanto ao tempo de reverberação o valor obtido para a sala B024 é demasiado elevado quando comparado com os limites máximos impostos na legislação. É de salientar o facto de Portugal e França estabelecerem um limite máximo superior ao Reino Unido e à Nova Zelândia, isto deve-se ao facto dos limites serem impostos tendo em conta o volume da sala e não o fim a que se destinam. Este facto reforça a ideia o da necessidade de a legislação ter em consideração a finalização das salas e não o seu volume, pois uma sala com um volume grande não tem necessariamente de ter um tempo de reverberação elevado e nas situações em que é necessário uma boa inteligibilidade da palavra tal implica sempre um baixo tempo de reverberação.

Relativamente ao índice de isolamento sonoro a ruídos aéreos, os valores obtidos para as situações FL+RD, FL+P e FL+B cumprem a legislação portuguesa, no entanto o valor mínimo regulamentar é demasiado baixo pois os ruídos externos continuam a ouvir-se demasiado no interior da sala em questão. Este valor deveria ser superior ou igual a 36 dB. Uma possível solução a adotar passaria pela colocação de portas com melhor isolamento, como por exemplo uma porta de madeira lacada da marca *Archiwood* [45], com uma redução sonora ( $R_w$ ) de 30 dB. Verifica-se ainda que a legislação portuguesa é a que impõe o limite menor do índice de isolamento sonoro a ruídos aéreos quando comparado com a legislação dos restantes países comentados.

Para terminar a análise do Quadro 7.1, o RASTI obtido na sala B024 também se encontra abaixo do limite mínimo imposto na legislação do Reino Unido, uma das legislações com exigências mais rígidas que Portugal. Tratando-se de uma sala onde a inteligibilidade da palavra é fundamental este valor deveria rondar no mínimo os 0,6. Posto tudo isto, é necessário a adoção de medidas que tornem esta sala de aula mais apropriada ao fim a que se destina, proporcionando melhores condições para uma boa aprendizagem por parte dos alunos.

Quadro 7.1 - Comparação do tempo de reverberação, índice de isolamento a ruídos de condução aérea e RASTI com diversas legislações

Parâmetros avaliados				
TR		DnT,w [dB]		RASTI
[500, 1k, 2k Hz] (s)				
Valores medidos na sala B024 (-I)	1,6	Situação FL: 27		0,50
		Situação FL+RD: 30		
		Situação FL+E: 29		
		Situação FL+P: 30		
		Situação FL+B: 30		
Países				
Portugal [38] (+I)	≤ 0,82	≥ 30 <sup>a)</sup>	Situação FL: 27	-
			Situação FL+E: 29	-
			Situação FL+RD, FL+P e FL+B: 30	-
Reino Unido [39]	≤ 0,8	≥ 45 <sup>a)</sup>	Todas as situações	≥ 0,6
França [41]	≤ 1,2	≥ 30 <sup>a)</sup>	Situação FL: 27	-
			Situação FL+E: 29	
			Situação FL+RD, FL+P e FL+B: 30	
Nova Zelândia [42]	≤ 0,5	≥ 48 <sup>b)</sup>	Todas as situações	-
Não cumpre o critério		Cumpre o critério		

a)  $D_{nT,w}$ ; b) Previsível  $D_{nT,w}$  ( $D_{nT,w} \approx R_w - 2$ ).

## 7.2. COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS PARA A SALA B024 COM OS VALORES OBTIDOS PARA UMA SALA ACUSTICAMENTE TRATADA (B032)

Considerou-se indispensável a comparação dos resultados obtidos para a sala B024 com uma sala acusticamente tratada (B032). Na Figura 7.1 é apresentada uma fotografia da sala B032 da FEUP, esta possui alcatifa em todo o piso, teto e parede de fundo revestidos com material absorvente, janelas com tratamento acústico nas caixilharias, cadeiras almofadadas, uma antecâmara que separa a sala do exterior, ajudando na atenuação do ruído proveniente dos corredores e um óculo envidraçado na porta que possibilita a visão para o interior [46].



Figura 7.1 - Sala da FEUP acusticamente tratada (B032) [Fotografia da autora]

O Quadro 7.2 compara a variação entre uma sala acusticamente tratada (sala B032) e a sala em estudo (B024). É possível verificar que existe uma melhoria considerável no tempo de reverberação (cerca de 1,2 s) o que origina também um aumento da inteligibilidade da palavra de 0,27. É de salientar o facto da sala B032 ter um volume bastante mais elevado que a sala B024 e um tempo de reverberação bastante inferior. Assim, é possível perceber que uma sala devidamente tratada contribui para uma grande melhoria acústica.

Quadro 7.2 - Comparação entre a sala acusticamente tratada (B032) e a sala em estudo (B024) [46]

Sala	V (m <sup>3</sup> )	TR <sub>[5001 1k, 2k Hz]</sub> (s)	RASTI
B024	167 m <sup>3</sup>	1,8	0,50
B032	313 m <sup>3</sup>	0,6	0,77
Δ (B024 - B032)	-	1,2	-0.27





## 8

SUGESTÃO DE MELHORIA PARA A  
SALA B024

Com o intuito de melhorar as condições acústicas da sala B024 (e de todas as outras do mesmo tipo) de modo a poder verificar um tempo de reverberação adequado para o fim a que esta se destina, efetuou-se um estudo prático de correção acústica possível para o teto da sala. Para esta correção foram propostos dois materiais diferentes (Quadro 8.1).

Quadro 8.1 - Materiais utilizados para a correção acústica da sala B024

Produto	Espessura (mm)	Custo (**) (€/m <sup>2</sup> )	Coeficiente de absorção sonora			Imagem
			Frequência (Hz)			
			500	1000	2000	
K13 fc [48]	12	25	0,46	0,87	1,07*	
SonaKrete [49]	6,35	54	0,39	0,69	0,83	

(\*) Nos cálculos foi usado 1,00;    (\*\*) Não inclui custo de mão-de-obra nem IVA.

Utilizando a fórmula de *Sabine* (Equação 3.1) determinou-se a absorção sonora real existente na sala B024, em bandas de frequência de oitava dos 500 aos 2000 Hz. No Quadro 8.2 são apresentados os valores da absorção sonora real obtidos na sala em estudo.

Quadro 8.2 - Absorção sonora real existente na sala B024, em bandas de frequência de oitava dos 500 aos 2000 Hz

Situação inicial			
Frequência (Hz)	500	1000	2000
TR (s) Medido na sala	1,90	1,79	1,77
Volume da sala (m <sup>3</sup> )	167		
Absorção sonora estimada a partir do TR (m <sup>2</sup> )	14,1	14,9	15,1

Como referido anteriormente o tempo de reverberação obtido é muito elevado para uma sala de aula. Posto isto, é proposta uma correção ao nível do teto, com a colocação de elementos absorventes sonoros. Esta correção foi efetuada tendo como objetivo primordial diminuir o tempo de reverberação, para bandas de frequência 500/1k/2k Hz, para um valor recomendável para uma sala de aula ( $\approx 0,6$  s).

Os resultados obtidos para o tempo de reverberação resultante da correção efetuada são apresentados nos Quadros 8.3 e 8.4 considerando o *K-13 fc* e o *SonaKrete*, respetivamente.

Na Figura 8.1 é apresentado o gráfico dos valores do tempo de reverberação calculados para as duas propostas de correção e a comparação entre os valores médios medidos na sala (B024).

Quadro 8.3 - Valores calculados do tempo de reverberação da sala de acordo com a proposta de correção 1, em bandas de frequência de oitava dos 500 Hz aos 2000 Hz

Proposta 1: Situação inicial mais teto absorvente sonoro – <i>K13 fc</i>			
	A (m <sup>2</sup> )		
TR (s) Medido na sala	1,90	1,79	1,77
Absorção sonora prevista pelo TR	14,1	14,9	15,1
	-		
Teto renovado ( <i>K13 fc</i> ) [48]: <b>S= 43 m<sup>2</sup></b>	19,8	37,4	43,0
Teto original (Gesso cartonado) [50]: <b>S= 14 m<sup>2</sup></b>	1,4	0,7	0,7
Volume: <b>167 m<sup>3</sup></b>	-		
Absorção sonora final prevista	29,5	50,2	55,9
	TR (s)		
TR <sub>[500, 1k, 2kHz]</sub> (s) calculado	0,9	0,5	0,5
TR <sub>[500, 1k, 2kHz]</sub> (s) médio calculado	0,6		



Quadro 8.4 - Valores calculados do tempo de reverberação da sala de acordo com a proposta de correção 2, em bandas de frequência de oitava dos 500 Hz aos 2000 Hz

Proposta 2: Situação inicial mais teto absorvente sonoro - <i>Sonakrete</i>			
	A (m <sup>2</sup> )		
TR (s) Medido na sala	1,90	1,79	1,77
Absorção sonora prevista pelo TR	14,1	14,9	15,1
	-		
Teto renovado ( <i>Sonakrete</i> ) [48]: <b>S= 53m<sup>2</sup></b>	20,7	36,6	44,0
Teto original (Gesso cartonado) [50]: <b>S= 4m<sup>2</sup></b>	0,4	0,2	0,2
Volume: <b>167 m<sup>3</sup></b>	-		
Absorção sonora final prevista	29,4	48,8	56,4
	TR (s)		
TR <sub>[500, 1k, 2kHz]</sub> (s) calculado	0,9	0,5	0,5
TR <sub>[500, 1k, 2kHz]</sub> (s) médio calculado	0,6		

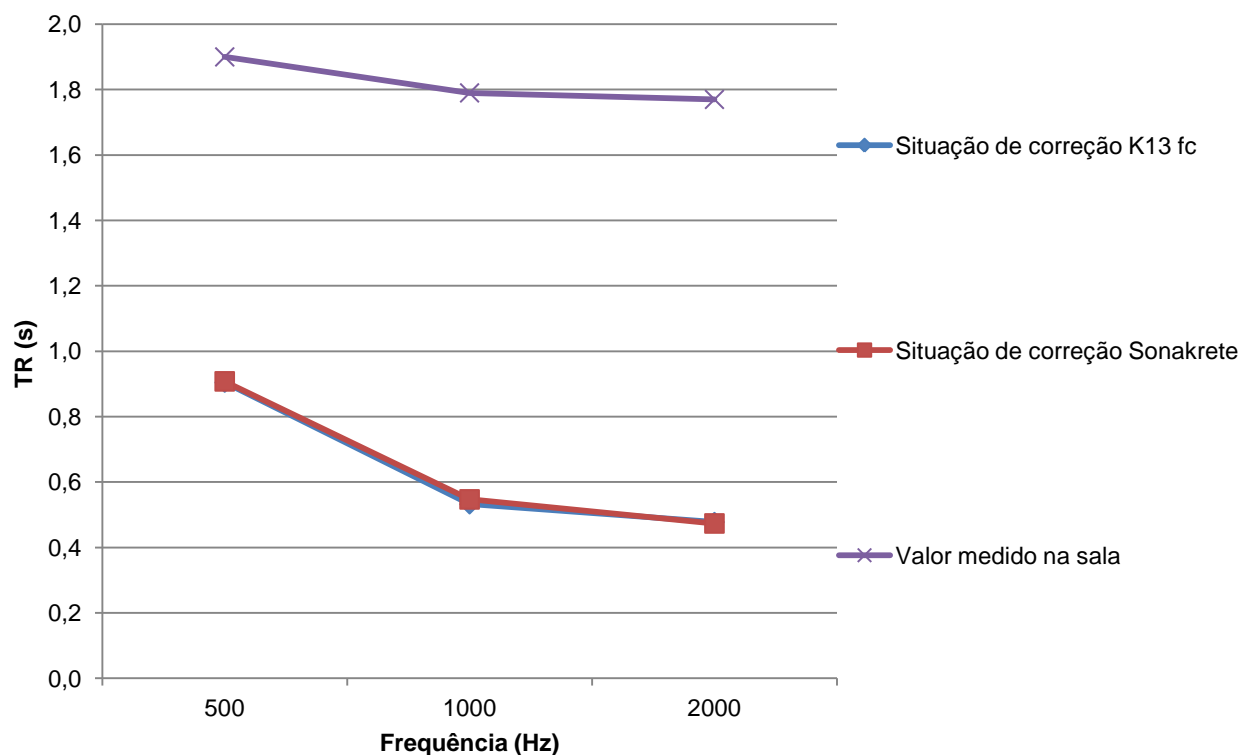


Figura 8.1 - Valores obtidos para o tempo de reverberação após intervenção de correção na sala B024, em bandas de frequência de oitava dos 500 aos 2000 Hz. Comparação do valor medido na sala com as propostas de correção

Efetuada uma breve análise das propostas de melhoria apresentadas para a sala B024 é possível verificar que com uma intervenção apenas ao nível do teto, permitiu reduzir o tempo de reverberação em 1,2 s, para valores finais de cerca de 0,6 s, o que é muito expressivo pois a intervenção proposta foi muito localizada.

Note-se que as áreas consideradas para os materiais propostos variam consoante os seus coeficientes de absorção sonora. Quanto maior forem estes valores menor será a área de teto necessária intervir, para obter um tempo de reverberação adequado para a sala de aula ( $\approx 0,6$  s). Nas Figuras 8.2 e 8.3 encontram-se representadas as áreas de teto da sala B024 preenchidas com *K13 fc* e *Sonakrete*, respetivamente.

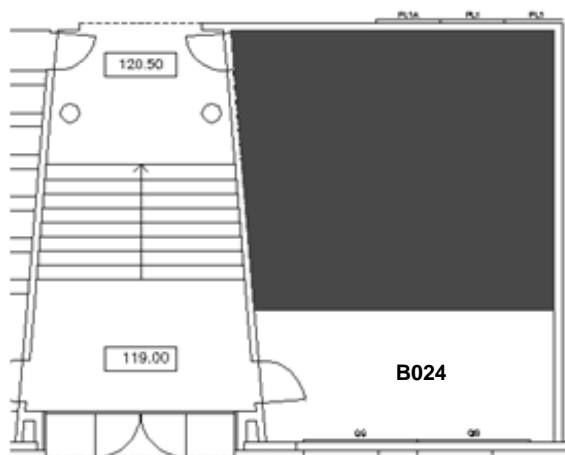


Figura 8.2 - Área de teto da sala B024 preenchida com *K13 fc* (43 m<sup>2</sup>)

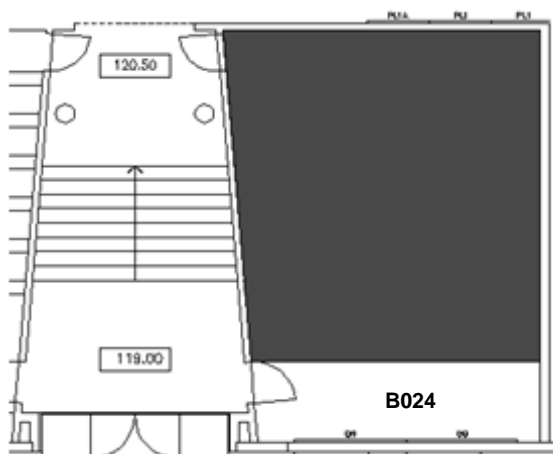


Figura 8.3 - Área de teto da sala B024 preenchida com *Sonakrete* (53 m<sup>2</sup>)

# 9

## CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

### 9.1. CONCLUSÕES

A presente dissertação teve como objetivo o estudo do isolamento sonoro em salas de aula, no caso particular do efeito de colmatação de frinchas existentes em portas. Este estudo foi dividido em duas fases.

Na primeira fase de estudo foram realizadas medições *in situ* sem material de isolamento sonoro nas frinchas existentes nas portas de uma sala típica em análise. Foram avaliados parâmetros acústicos como o RASTI, o tempo de reverberação, o ruído de fundo e o índice de isolamento sonoro a ruídos de condução aérea.

Para o valor de RASTI foi obtido um valor médio de 0,50, o que corresponde a um valor baixo pois, como se trata de uma sala de aula, um local vocacionado à concentração e compreensão, o valor mais adequado seria acima dos 0,60, correspondendo a uma inteligibilidade da palavra entre “boa” e “muito boa”.

Quanto ao tempo de reverberação da sala de aula foi obtido um valor médio na banda de frequência dos 500 aos 2000 Hz de 1,8 s, ou seja um valor bastante acima de quaisquer valores ideais. Tal valor quando comparado com a legislação inglesa, francesa, zelandesa e mesmo portuguesa demonstra que o espaço não respeita os valores regulamentares, tornando as salas em qualquer um destes países inadequadas ao fim a que se destinam. Por forma a melhorar o tempo de reverberação da sala são apresentadas propostas de correção acústica da mesma. Tal correção passa pela colocação apenas de um material absorvente no teto da sala numa área suficiente para que o tempo de reverberação médio seja reduzido para um valor inferior a 0,8 s (limite máximo imposto no RRAE [38]) e aconselhável para uma sala de aula ( $\approx 0,6$  s), sendo apresentadas duas soluções possíveis com aspetos finais de acabamento diferentes.

Por último, foi possível verificar ainda que a parede divisória entre a sala e o corredor (com duas portas) tem um isolamento sonoro bruto de 22 dB(A) e um índice de isolamento sonoro a ruídos de condução aérea de 23 dB, ou seja, um valor bastante inferior aos das legislações inglesa, francesa, zelandesa e mesmo portuguesa.

Com o intuito de melhorar o índice de isolamento sonoro a ruídos de condução aérea e numa segunda fase de estudo procedeu-se à colocação de diferentes materiais de isolamento sonoro nas frinchas existentes em todo o perímetro das portas da sala de aula em estudo. Nesta fase são apresentados resultados normalizados e não normalizados. Estes últimos são apresentados com uma casa decimal devido à semelhança dos valores obtidos para os diferentes materiais, permitindo ter uma maior precisão nas conclusões e escolha do material a adotar para a situação em análise.

Perante os materiais analisados o que obteve melhores resultados tendo em conta o aumento do índice de isolamento sonoro a ruídos aéreos e a diminuição dos níveis de pressão sonora no interior da sala (B024), relativamente à situação inicial (sem tratamento das frinchas), foi a colocação da borracha adesiva no aro da porta e a colocação do rolo duplo na frincha inferior.

Esta pequena intervenção permitiu um aumento do índice de isolamento sonoro a ruídos de condução aérea não normalizado (valor apresentado com uma casa decimal) de 4,3 dB relativamente à situação inicial. Não tratando a frincha inferior só se obtém um ganho de 1,7 dB. Obteve-se assim um índice de isolamento sonoro a ruídos de condução aérea normalizado de 27 dB, apesar de não ser um valor aconselhável para uma sala de aula, já se encontra de acordo com a legislação portuguesa em vigor (adicionando o fator I). Uma alternativa para obter um índice de isolamento sonoro maior seria, como já foi mencionado, a colocação de portas de melhor qualidade acústica, com uma redução sonora superior às que se encontram atualmente neste tipo de salas.

Quanto à diminuição dos níveis de pressão sonora, dando especial atenção à banda de frequências dos 2000 aos 3150 Hz verifica-se que a situação FL+RD é a mais eficaz. Esta solução permite uma diminuição dos níveis de pressão sonora no seu interior de 4,7 dB (4,5 dB(A)), relativamente à situação inicial, e uma melhor compreensão do discurso no interior da sala em análise.

Em suma, dos materiais de isolamento sonoro analisados na sala B024 o que permitiu obter melhores resultados e por isso o material a adotar para a colmatação das frinchas existentes nas portas da sala seria a colocação do rolo duplo na frincha inferior e a colocação de uma borracha adesiva no aro da porta.

## **9.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS**

Por forma a completar este trabalho e a torná-lo mais abrangente, entende-se como necessário efetuar mais avaliações. Seria útil:

- Efetuar avaliações do isolamento sonoro a ruídos de condução aéreo padronizado a portas de salas de aula de outras faculdades próximas à FEUP;
- Efetuar avaliações do isolamento sonoro a ruídos de condução aérea padronizado a portas de salas de aula de escolas secundárias reabilitadas recentemente pelo Parque Escolar;
- Alargar o estudo realizado na sala B024 para salas de aula com apenas uma porta, avaliando parâmetros acústicos como o ruído de fundo, os níveis de pressão sonora e o índice de isolamento sonoro a ruídos de condução aérea;
- Realizar inquéritos de avaliação subjetiva aos utilizadores da sala de aula em estudo, permitindo avaliar o nível de incómodo sentido pelos utilizadores do espaço face ao ruído proveniente do exterior. Nesta situação seriam pronunciadas algumas palavras na sala de aula, previamente selecionadas, e os ouvintes presentes na sala redigiriam para cada palavra proferida o que realmente entenderam. No final seriam correlacionadas as palavras redigidas pelos ouvintes com os dados efetivamente corretos;
- Avaliar o índice de isolamento sonoro a ruídos de condução aérea da sala de aula em estudo com um novo modelo de porta, com maior redução sonora do que as portas atualmente existentes na sala.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Carvalho, António Pedro Oliveira de. *Acústica Ambiental e de Edifícios*. Edição 8.5, F.E.U.P., 2013.
- [2] Ondas longitudinais, <http://www.infoescola.com/fisica/ondas-longitudinais/>. Acedido a 5/3/2014.
- [3] Pressão sonora, <http://paginas.fe.up.pt/~earpe/conteudos/ARE/Apontamentosdadiiplina.pdf>. Acedido a 5/3/2014.
- [4] Almeida, Manuela; Silva, Sandra; Ferreira, Tiago. *Física das construções Acústica Ambiental e de Edifícios*. UM, 2006.
- [5] Pressão eficaz (RMS), <http://www.castlegroup.co.uk/sound-pressure-level/>. Acedido a 6/3/2014.
- [6] Intensidade sonora, <http://taniapinto23.wordpress.com/2011/04/04/audio-visual/>. Acedido a 7/3/2014.
- [7] Velocidade do som em diferentes materiais, <http://profs.ccems.pt/PaulaFrota/velocidadeluzsom.htm>. Acedido a 7/3/2014.
- [8] Níveis de potência sonora e a correspondente pressão e intensidade sonora, <http://www.newtoncbraga.com.br/index.php/almanaque/542-tabela-de-niveis-sonoros-l-e-pressao-sonora-correspondente-e-intensidade-sonora.html>. Acedido a 7/3/2014.
- [9] Frequências do som, <http://www.if.ufrgs.br/cref/ntef/som/>. Acedido a 8/3/2014.
- [10] Espectro sonoro, [http://www.aulas-fisica-quimica.com/8f\\_07.html](http://www.aulas-fisica-quimica.com/8f_07.html). Acedido a 8/3/2014.
- [11] Largura de banda, <http://daryalytayamm12.blogspot.pt/>. Acedido a 8/3/2014.
- [12] Fonte sonora pontual, [http://xa.yimg.com/kq/groups/20469685/1366128443/name/UNKNOWN\\_PARAMETERVALUE](http://xa.yimg.com/kq/groups/20469685/1366128443/name/UNKNOWN_PARAMETERVALUE). Acedido a 10/3/2014.
- [13] Fonte sonora linear, [http://www.apambiente.pt/zdata/DAR/Ruido/o\\_rudo\\_e\\_a\\_cidade.pdf](http://www.apambiente.pt/zdata/DAR/Ruido/o_rudo_e_a_cidade.pdf). Acedido a 10/3/2014.
- [14] Morfologia do ouvido humano, <http://ouveosilencio.wordpress.com/surdez/morfologia-do-ouvido/>. Acedido a 10/3/2014.
- [15] Cóclea humana, <http://ptolentinobioresearch.wikispaces.wikispaces.com/%3E%3E+Describe+the+anatomy+and+function+of+the+human+ear>. Acedido a 10/3/2014.
- [16] Células ciliadas, <http://www.riversideonline.com/healthreference/Ear-Nose-Throat/DS00365.cfm>. Acedido a 11/3/2014.
- [17] Membrana basilar, <http://www.afh.bio.br/sentidos/Sentidos4.asp>. Acedido a 11/3/2014.
- [18] Curvas de igual sensibilidade auditiva, <http://www.engineeringtoolbox.com/nc-noise-criterion-d725.html>. Acedido a 11/3/2014.
- [19] Curvas de ponderação A, B, C e D, <http://www.engineeringtoolbox.com/nr-noise-rating-d60.html>. Acedido a 11/3/2014.
- [20] Energia sonora, <http://www.ibertec.com.br/iframes/suporte4.php>. Acedido 12/3/2014.
- [21] Dispersão sonora, <http://audiodifusores.com/nhx.php>. Acedido a 12/3/2014.
- [22] Difração sonora, [http://wiki.stoa.usp.br/Fap0459/textos/grupo\\_AlexAndre/Gregori/Diego/CI%C3%B3vis](http://wiki.stoa.usp.br/Fap0459/textos/grupo_AlexAndre/Gregori/Diego/CI%C3%B3vis). Acedido a 12/3/2014.

- [23] Refração sonora, [http://www.lucianosantarita.pro.br/ultra\\_som.html](http://www.lucianosantarita.pro.br/ultra_som.html). Acedido a 12/3/2014.
- [24] BRÜEL & KJAER. *Application Note: measuring speech intelligibility using DIRAC- Type 784*. In: Catálogo técnico, Brüel & Kjaer Instruments, pág.13, Chicago, Illinois, USA, 2005.
- [25] Propagação do som, <http://dc444.4shared.com/doc/r33lrM8x/preview.html>. Acedido a 13/3/2014.
- [26] Representação esquemática de um ressoador, <http://br.monografias.com/trabalhos3/relacao-homem-ambiente-laboral/relacao-homem-ambiente-laboral3.shtml>. Acedido a 13/3/2014.
- [27] Department for Education and Skills. Building Bulletin 93 – Acoustic Design for Schools. Londres, 2003.
- [28] Transmissão sonora direta entre dois compartimentos, [http://www.scielo.br/scielo.php?Pid=S1678-86212010000400012&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.br/scielo.php?Pid=S1678-86212010000400012&script=sci_arttext). Acedido a 14/3/2014.
- [29] NP EN ISO 717-1. IPQ – Instituto Português da Qualidade. Acústica. Determinação do isolamento sonoro em edifícios e de elementos de construção. Parte 1: Isolamento sonoro a sons de condução aérea, 2013.
- [30] Fernandes, J.C.. *Inteligibilidade Acústica da Linguagem*. Apontamentos do Curso de Inteligibilidade Acústica da Linguagem oferecido durante o XIX, Belo Horizonte, 2000.
- [31] The Master Handbook of Acoustics, Fourth edition – McGraw-Hill, 2000.
- [32] Direccionalidade frontal da voz, <http://dc444.4shared.com/doc/9s3h5L7r/preview.html>. Acedido a 14/3/2014.
- [33] Inteligibilidade da palavra, [http://www.simpep.feb.unesp.br/anais/anais\\_13/artigos/823.pdf](http://www.simpep.feb.unesp.br/anais/anais_13/artigos/823.pdf). Acedido a 14/3/2014.
- [34] Curva de incomodidade NC, [http://www.engineeringtoolbox.com/nc-noise-criterion-d\\_725.html](http://www.engineeringtoolbox.com/nc-noise-criterion-d_725.html). Acedido a 14/3/2014.
- [35] Curva de incomodidade NR, [http://www.engineeringtoolbox.com/nr-noise-rating-d\\_60.html](http://www.engineeringtoolbox.com/nr-noise-rating-d_60.html). Acedido a 14/3/2014.
- [36] López e Manuel Recuero. *Acústica Arquitectonica Aplicada*. Editorial Paraninfo, Madrid, 1999.
- [37] Mateus, Diogo. *Acústica de edifícios e controlo do ruído*. Coimbra, 2008.
- [38] Regulamento de Requisitos Acústicos em Edifícios – DL 96/ 2008 de 9 de Junho.
- [39] Building Regulations 2000 – Building Bulletin 93 – Acoustic Design for Schools. TrevorHickman, August, 2003.
- [40] Building Regulations 2000 – Building Bulletin 87 – Acoustic Design for Schools. Trevor Hickman, August, 2003.
- [41] Ministère de l'écologie et du développement durable; França – 23 de Abril de 2003.
- [42] AS/NZS 2107:2000. Acoustics – Recommended Design Sound Levels and Reverberation Times for Building Interiors.
- [43] Isolamento sonoro para portas, <http://www.maxmat.pt/AdviceDetail.aspx?id=60>. Acedido a 12/4/2014.
- [44] Planta da FEUP, <http://paginas.fe.up.pt/~jupiter/docs/plantas.html>. Acedido a 27/5/2014.

- [45] Catálogo Archiwood, <http://www.carpincasais.pt/documentos/201208241745551345826755625.pdf>. Acedido a 20/5/2014.
- [46] Silva, Carlos Miguel Ferreira e. *O tempo de reverberação e a inteligibilidade da palavra. Caso de estudo: Salas de aula da FEUP*. Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, FEUP, Julho de 2013.
- [47] EN 12354-6. Building Acoustics – Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements – Part 6: Sound absorption in enclosed spaces, 2003.
- [48] Catálogo comercial do produto *K13 fc* empresa Asona, <http://www.asonaindia.com/ProductDetails.aspx?mid=33>. Acedido a 21/5/2014.
- [49] Catálogo comercial do produto *SonaKrete* empresa S.T.I.E.R., <http://stier-acustica.com/Ficheiros.ashx?i=11849>. Acedido a 21/5/2014.
- [50] Coeficientes de absorção sonora, <http://logacustica.com/coeficientes-de-absorcao-sonora-sound-absorption-coefficients/>. Acedido a 21/5/2014.
- [51] Efeitos nocivos do ruído, [http://www.cimal.pt/index.php?option=com\\_content&view=article&id=144%3Aefeitos-nocivos-do-ruído&catid=42&Itemid=200](http://www.cimal.pt/index.php?option=com_content&view=article&id=144%3Aefeitos-nocivos-do-ruído&catid=42&Itemid=200). Acedido a 24/2/2014.
- [52] EN ISO 11654:1997, Acoustics-sound absorbers for use in buildings-rating of sound absorption, 1997.
- [53] ASTM C423 – 99a: *Standard test method for sound absorption and sound absorption coefficients by the reverberation room method*. American Society for Testing and Materials, Volume 04.06, 100 Barr Harbor Drive, West Conshohocken, PA 19428-2959.
- [54] EN ISO 140. European Norm Standard – Measurement of sound insulation in buildings elements, 2004.
- [55] Riscos físicos, <http://www.prof2000.pt/users/eta/Ruido.htm>. Acedido a 18/2/2014.
- [56] Acústica de salas, <http://www.gradadm.ifsc.usp.br/dados/20122/FFI0210-1/Acustica%20de%20Salas.pdf>. Acedido a 18/2/2014.
- [57] Acústica em salas de aula, <http://asa.aip.org/classroom/booklet.html>. Acedido a 24/2/2014.
- [58] O som, [http://www.explicatorium.com/CFQ8/Som\\_Como\\_se\\_produz\\_e\\_propaga.php](http://www.explicatorium.com/CFQ8/Som_Como_se_produz_e_propaga.php). Acedido a 24/2/2014.
- [59] Elementos de acústica, [http://www.fisica.net/ondulatoria/elementos\\_de\\_acustica.pdf](http://www.fisica.net/ondulatoria/elementos_de_acustica.pdf). Acedido a 27/2/2014.
- [60] O ouvido humano, <http://www.mundoeducacao.com/fisica/o-ouvido-humano.htm>. Acedido a 10/3/2014.
- [61] Avaliação acústicas de salas de aula em escolas públicas, [http://www.ufpa.br/gva/Arquivos%20PDF/I\\_WORKSHOP\\_TUCURUI/Workshop\\_Tucurui/Trabalhos\\_04\\_08\\_2011/04\\_T01\\_Avaliacao\\_acustica\\_de\\_salas\\_de\\_aula.pdf](http://www.ufpa.br/gva/Arquivos%20PDF/I_WORKSHOP_TUCURUI/Workshop_Tucurui/Trabalhos_04_08_2011/04_T01_Avaliacao_acustica_de_salas_de_aula.pdf). Acedido a 15/3/2014.
- [62] Isolamento sonoro a sons aéreos, [http://www.estt.ipt.pt/download/disciplina/2959\\_isol\\_sonsaereos.pdf](http://www.estt.ipt.pt/download/disciplina/2959_isol_sonsaereos.pdf). Acedido a 16/3/2014.
- [63] Speech Transmission Index, <http://www.embeddedacoustics.com/index.php/speech-transmission-index>. Acedido a 16/3/2014.

[64] Carvalho, A.P. Oliveira de. *Influence of architectural features and styles on various acoustical measures in churches*. Dissertação de Doutorado, Universidade da Flórida, EUA, 1994.

[65] Andrade, Joana Maria Figueiredo Mota. *Caracterização do Conforto Acústico em Escola*, Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, FEUP, Fevereiro de 2009.